ТУСУР | TUSUR UNIVERSITY

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 ТУСУР!

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

Информационный центр абитуриента: magistrant.tusur.ru

ТУСУР | TUSUR UNIVERSITY

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР



ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2020»
г. Томск, 13–30 мая 2020 г.
(в двух 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)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

**по материалам
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2020»**

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В двух частях

Часть 1

В-Спектр
2020

УДК 621.37/.39+681.518 (063)
ББК 32.84я431+32.988я431
С 23

С 23 Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – 332 с.
ISBN 978-5-91191-434-9
ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)
ISBN 978-5-91191-436-3 (Ч. 2)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР включает избранные доклады по итогам Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Конференция посвящена различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированых систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанофотоники, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности, в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по математическому моделированию в технике, экономике и менеджменте, 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 978-5-91191-434-9
ISBN 978-5-91191-435-6 (Ч. 1)

© Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2020

Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020»

13–30 мая 2020 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Рулевский В.М. – председатель Программного комитета, ректор ТУСУРа, к.т.н., доцент;
- Лощилов А.Г. – заместитель председателя Программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н., доцент;
- 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), н.с. каф. ТОР ТУСУРа;
- Беляев Б.А., зав. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники Ин-та физики СО РАН, д.т.н., г. Красноярск;
- Васильковская Н.Б., доцент каф. экономики ТУСУРа, к.э.н.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС ТУСУРа, к.т.н.;
- Давыдова Е.М., доцент каф. КИБЭВС ТУСУРа, к.т.н.;
- Дмитриев В.М., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.ф.-м.н., доцент;
- Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Зариковская Н.В., доцент каф. АОИ, генеральный директор ООО «АльдераСофт», к.ф.-м.н.;
- Исакова А.И., доцент каф. АСУ ТУСУРа, к.т.н.;
- Карателли Д., PhD (Sapienza University of Rome), технический директор компании The Antenna Company Nederland B.V.;
- Карташев А.Г., проф. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.б.н.;
- Катаев М.Ю., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Ким М.Ю., зав. каф. ИСР ТУСУРа, к.и.н., доцент;
- Костина М.А., доцент каф. УИ ТУСУРа, 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.;
- 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.;
- Михальченко Г.Я., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, д.т.н.;

- Михальченко Г.Я., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, 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., доцент;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ ТУСУРа, к.филос.н., доцент;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР НГТУ, д.т.н., г. Новосибирск;
- Рогожников Е.В., доцент каф. ТОР ТУСУРа, к.т.н.;
- Ромашко Р.В., член-корреспондент РАН, член Президиума ДВО РАН, проф. ДВФУ, д.ф.-м.н., г. Владивосток;
- Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, к.т.н.;
- Семенов Э.В., проф. каф. РСС ТУСУРа, д.т.н., доцент;
- Сенченко П.В., проректор по учебной работе ТУСУРа, доцент каф. АОИ, к.т.н.;
- Соломин С.К., зав. каф. ГП ТУСУРа, д.ю.н., доцент;
- Суслова Т.И., декан ГФ ТУСУРа, зав. каф. ФиС, д.ф.н., проф.;
- Тисленко В.И., проф. каф. РТС ТУСУРа, д.т.н.;
- Титов В.С., зав. каф. вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, д.т.н., проф., заслуженный деятель наук РФ, академик международной академии наук ВШ;
- Троян П.Е., зав. каф. ФЭ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.т.н.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа, д.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, д.т.н., проф.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Лощилов А.Г. – председатель Организационного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н., доцент;
- Медовник А.В. – заместитель председателя Организационного комитета, начальник научного управления, к.т.н., доцент;
- Боберь Ю.Н., инженер ОАиД;
- Климов А.С., председатель Совета молодых ученых, ст. научный сотрудник лаборатории плазменной электроники каф. физики, д.т.н., доцент;
- Коротина Т.Ю., зав. аспирантурой и докторантурой, к.т.н.;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ, к.филос.н., доцент;
- 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 – Тисленко Владимир Ильич, проф. каф. РТС, д.т.н., проф.; зам. председателя – Захаров Фёдор Николаевич, 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., доцент.

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

Подсекция 1.4. Аудиовизуальная техника, цифровое телерадиовещание и информационный сервис. Председатель секции – Курячий Михаил Иванович, доцент каф. ТУ, к.т.н.; зам. председателя – Зайцева Екатерина Викторовна, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Подсекция 1.5. Инфокоммуникационные технологии и системы широкополосного беспроводного доступа. Председатель секции – Рогожников Евгений Васильевич, доцент каф. ТОР, к.т.н.; зам. председателя – Демидов Анатолий Яковлевич, проф. каф. ТОР, к.ф.-м.н.

Подсекция 1.6. Робототехника. Председатель секции – Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, к.т.н.; зам. председателя – Винник Александр Евгеньевич, н.с. каф. КСУП.

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, доцент каф. КСУП, к.т.н.

Секция 2. Электроника и приборостроение

Подсекция 2.1. Проектирование биомедицинских электронных и наноэлектронных средств. Председатель секции – Еханин Сергей Георгиевич, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент; зам. председателя – Романовский Михаил Николаевич, доцент каф. КУДР, к.т.н.

Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры. Председатель секции – Лощилов 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 – Михальченко Геннадий Яковлевич, директор НИИ ПрЭ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Семёнов Валерий Дмитриевич, проф. каф. ПрЭ, 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., доцент; зам. председателя – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, к.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., доцент.

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

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, заместитель генерального директора 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., доцент.

Подсекция 3.7. Разработка программного обеспечения. Председатель секции – Зариковская Н.В., доцент каф. АОИ, генеральный директор ООО «АльдераСофт», к.ф.-м.н.

Подсекция 3.8. Инструментальные средства поддержки автоматизированного 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. Информационная безопасность. Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Конев Антон Александрович, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

Подсекция 4.2. Радиоэлектронные системы передачи информации и средства их защиты. 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 – Глухарева Светлана Владимировна, ст. 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., доцент.

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., доцент.

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

Подсекция 5.5. Современные социокультурные технологии в организации работы с молодежью. Председатель секции – Суслова

Татьяна Ивановна, декан ГФ, зав. каф. ФиС, д.филос.н., проф.; зам. председателя – Орлова Вера Вениаминовна, проф. каф. ФиС, директор НОЦ «СГТ», д.соц.н.

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

Подсекция 5.7. Правовые проблемы современной России. Председатель секции – Соломин Сергей Константинович, зав. каф. ГП, д.ю.н., доцент; зам. председателя – Газизов Родион Маратович, ст. преподаватель каф. ИП.

Секция 6. Экология и мониторинг окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности. Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н.; зам. председателя – Денисова Татьяна Владимировна, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

Секция 7. Открытия. Творчество. Проекты (секция для школьников). Председатель секции – Мозгунов Алексей Викторович, начальник ОНиР; зам. председателя – Колесник Анастасия Викторовна, инженер 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., доцент; зам. председателя – Шпит Елена Ирисметовна, ст. преподаватель каф. ИЯ; Соболевская Ольга Владимировна, ст. преподаватель каф. ИЯ; Таванова Эльвира Борисовна, ст. преподаватель каф. ИЯ.

Адрес оргкомитета:
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40
ФГБОУ ВО «ТУСУР»
Научное управление (НУ), к. 205. Тел.: 8-(382-2) 701-524
E-mail: nstusur@main.tusur.ru

1-я часть – 1-я и 2-я секции
2-я часть – 3-я; 4-я; 5-я, 6-я и 8-я секции.

Секция 7 (для школьников) издана отдельным сборником.

В конце каждой части сборника – ***информационное письмо о компании ООО «СТК» – генеральном спонсоре конференции.***

СЕКЦИЯ 1

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

(стр. 11–122)

СЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

(стр. 123–316)

Информационное письмо о компании ООО «СТК» – *генеральном спонсоре конференции*
(стр. 327–330)



СЕКЦИЯ 1

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ПОДСЕКЦИЯ 1.1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

*Председатель – **Тисленко В.И.**, проф. каф. РТС, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Захаров Ф.Н.**, доцент каф. РТС, к.т.н.*

УДК 621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ПЛАВУЧИХ ЗНАКОВ НАВИГАЦИОННОГО ОГРАЖДЕНИЯ

Н.К. Блинковский, аспирант
Научный руководитель В.П. Денисов, проф., д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. РТС, nkblink@yandex.ru

Приведены результаты экспериментального измерения флуктуаций эффективной площади рассеяния плавучих знаков навигационного ограждения. Оценены средние значения ЭПР исследуемых конических и цилиндрических буёв.
Ключевые слова: радиолокация; эффективная площадь рассеяния, буй, гистограмма распределения.

Известно, что радиолокационное наблюдение плавучих знаков навигационного ограждения в общем случае осуществляется вблизи статистически шероховатой границы раздела двух сред – «воздух – взволнованная водная поверхность» [1]. При этом плавучие знаки – буи – совершают случайные угловые колебания в некотором секторе углов $\pm\varphi_m$ около начального положения, характеризуемого углом наклона γ_0 относительно нормали к границе раздела двух сред. Вышеуказанные причины вызывают флуктуации эффективной площади рассеяния (ЭПР) буёв.

Наиболее распространенной вероятностной характеристикой ЭПР радиолокационной цели является среднее значение (математическое ожидание) [2]:

$$\bar{\sigma}(\gamma_0) = \int_{\gamma_0-\phi_m}^{\gamma_0+\phi_m} \sigma(\theta,\gamma) W(\gamma) d\gamma , \qquad (1)$$

где $W(\gamma)$ – плотность распределения углов наклона (качки), θ – угол скольжения.

В общем случае вид распределения углов качки может отличаться от равномерного, нормального или гармонического со случайной начальной фазой, широко применяемых при моделировании флуктуаций ЭПР радиолокационных целей.

Особенностью обнаружения плавучих знаков на внутренних водных путях является то, что буи совершают вынужденные колебательные движения также под воздействием речного течения даже при полном штиле (0 баллов по шкале Бофорта). Поэтому при оценке флуктуаций ЭПР плавучих знаков необходимо учитывать не только параметры, характеризующие взволнованную водную поверхность, но и направление и скорость речного течения.

Цель работы – экспериментальное измерение флуктуаций ЭПР плавучих знаков навигационного ограждения.

Измерения проводились с использованием судовой навигационной РЛС сантиметрового X-диапазона (рис. 1).

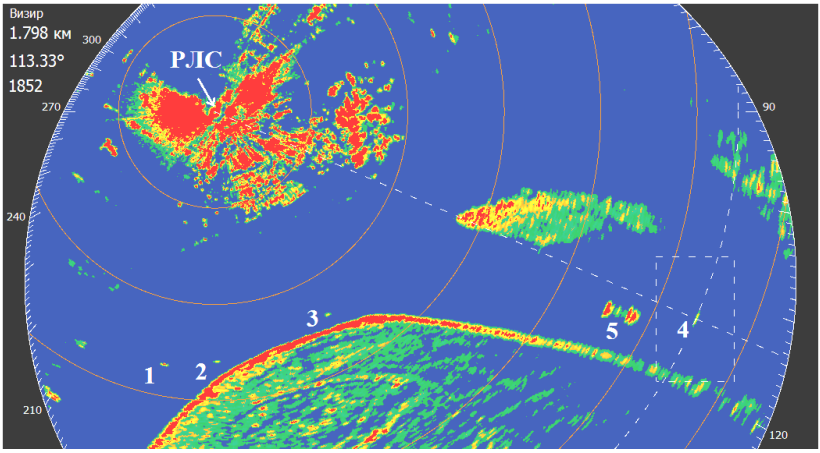


Рис. 1. Радиолокационное изображение участка р. Томь, поясняющее взаимное расположение исследуемых плавучих знаков навигационного ограждения и неподвижной РЛС:
1 и *4* – цилиндрические буи; *2* и *3* – конические буи; *5* – теплоход с баржей

Технические характеристики исследуемых буёв приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики исследуемых буёв

№ буя	Вид буя	Размеры надводной части, м	Угол скольжения, θ, град	Дальность до буя, *R*, м
1	Цилиндрический	Диаметр – 0,85. Высота – 1,25	4,9	882
2	Конический	Диаметр основания – 1,45.	5,1	858
3	Конический	Высота – 1,25	5,4	794
4	Цилиндрический	Диаметр – 0,85. Высота – 1,25	2,4	1798

Результатом работы являются измеренные значения флуктуаций ЭПР плавучих знаков навигационного ограждения.

На основе экспериментальных данных были рассчитаны и построены гистограммы ЭПР для конических (рис. 2) и цилиндрических (рис. 3) буёв. Калибровка РЛС проводилась по методике, изложенной в [3].

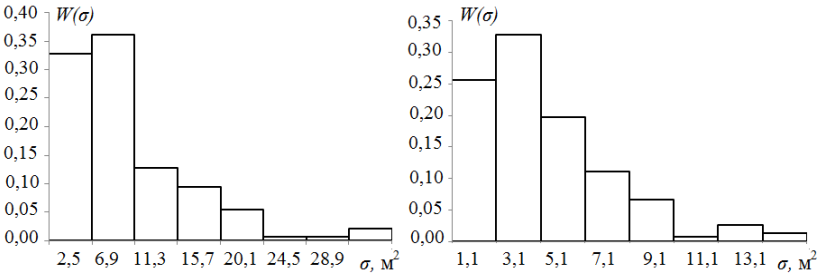


Рис. 2. Гистограммы ЭПР конических буёв: *а* – для буя № 2; *б* – для буя № 3

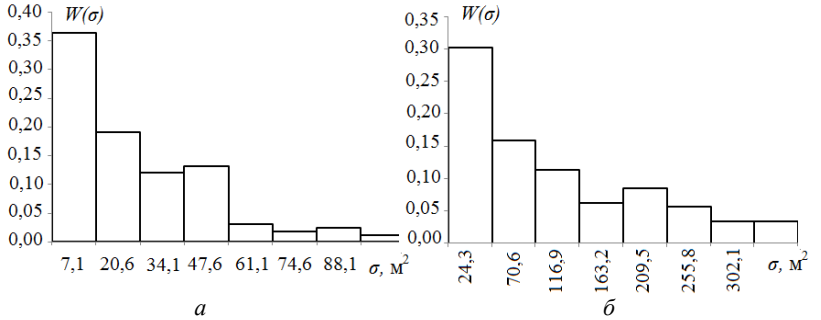


Рис. 3. Гистограммы ЭПР цилиндрических буёв: *а* – № 1; *б* – № 4

В табл. 2 приведены измеренные средние значения ЭПР плавучих знаков навигационного ограждения.

Таблица 2

Средние значения ЭПР исследуемых буёв

Буй	Цилиндрический № 1	Конический № 2	Конический № 3	Цилиндрический № 4
$\overline{\sigma}$, м^2	20,6	6,4	3,3	91,4

Заключение. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Флуктуации ЭПР плавучих знаков вблизи границы раздела двух сред носят негауссовский характер.

2. При одинаковых углах скольжения и волнениях водной поверхности средняя ЭПР цилиндрического буя превышает среднюю ЭПР конического буя. Для выравнивания максимальной дальности обнаружения буёв рекомендуется оснащение плавучих знаков радиолокационными отражателями кругового действия.

3. Средняя ЭПР буёв существенно уменьшается, если нормаль к поверхности раздела двух сред и перпендикуляр к направлению распространения падающего поля не лежат в секторе изменения угла наклона буёв.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин М.А. Моделирование флуктуаций эффективной площади рассеяния знаков навигационного ограждения / М.А. Бородин, В.В. Леонтьев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 4. – С. 54–60.

2. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.

3. Леонтьев В.В. Методика калибровки РЛС при измерении эффективной площади рассеяния цели над морем // Измерительная техника. – 2002. – № 11. – С. 37–40.

УДК 621.391.8

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ РАДИОПЕРЕДАТЧИКА РЕТРАНСЛЯТОРА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Д.О. Ноздреватых, магистрант; А.С. Аникин, доцент, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. РТС, rrb86@inbox.ru

Проанализированы виды ретрансляторов, их особенности, преимущества и недостатки. Рассмотрена многолучевая спутниковая система связи. Рассмотрено несколько методов по эффективности управления мощности в спутниковых системах связи.

Ключевые слова: ретранслятор, прозрачный ретранслятор, регенеративный ретранслятор, комбинированный ретранслятор, многолучевая спутниковая система связи.

В системах спутниковой связи важно повысить эффективность использования энергоресурсов, которая в свою очередь обусловливается дефицитом спутниковых энергоресурсов. Возможности и методы управления выходной мощностью радиопередатчиков линии радиосвязи космического аппарата определяются построением ретранслятора. Рассмотрим основные типы построения ретранслятора спутниковых систем радиосвязи.

По своему назначению и выполняемым функциям все ретрансляционные комплексы подразделяются на три типа: «прозрачные», регенеративные и комбинированные [1]. Каждый тип ретранслятора отличатся способом построения ствола (приёмопередающего тракта или транспондера).

Ствол ретрансляционного комплекса «прозрачного» типа в простейшем случае представляет собой приёмопередающий тракт с однократным преобразованием частоты: принятый сигнал в преобразователе частоты смещается на фиксированную величину, усиливается в передатчике и излучается антенной в окружающее пространство. Существуют «прозрачные» ретрансляционные комплексы гетеродинного типа: принятый сигнал в первом преобразователе частоты смещается на промежуточную частоту, после этого предварительно усиливается, затем поступает во второй преобразователь частоты. В этом преобразователе частоты сигнал на промежуточной частоте смещается на заданную частоту, далее поступает в усилитель передатчика и излучается антенной в окружающее пространство. Многоствольные «прозрачные» ретрансляторы содержат коммутаторы (если сигналы двух абонентов относятся к разным стволам ретранслятора, то коммутатор может передать сигнал из одного ствола в другой).

В комбинированном ретрансляторе с одним канальным процессором принятый сигнал разделяется на выходе приемника на n каналов, в каждом из которых осуществляется прозрачное преобразование сигналов. Отличие такого БРТК (бортового ретрансляционного комплекса) от «абсолютно» прозрачного ретранслятора заключается в следующем: в нескольких или одном канале устанавливается канальный процессор. Одно из преимуществ: легкость и простота модернизации прозрачного ретранслятора до комбинированного (каналы с обработкой сигналов включаются в обычный ретрансляционный ствол).

В отличие от «прозрачных» регенеративные ретрансляторы обеспечивают обработку сигналов на борту. Цифровая обработка сигналов происходит в процессе ремодуляции – приеме сигналов на одной частоте, их демодуляции и повторной модуляции на новой несущей.

Регенеративные ретрансляторы могут быть реализованы как ретрансляторы с коммутацией пакетов. Выбор конкретного протокола зависит от архитектуры системы и типа орбитальной группировки. Важное преимущество пакетной обработки – возможность использования асимметричных каналов на линиях «вверх» и «вниз», т.е. поддержка интерактивного режима. Наиболее сложным является ретранслятор с пакетной обработкой информации на борту и маршрутизацией. Маршрутизация в спутниковых ретрансляторах актуальна в низкоорбитальных системах, состоящих из множества промежуточных узлов в виде космических аппаратов-ретрансляторов.

Рассмотрим несколько методов по эффективности управления мощности в спутниковых системах связи. В системах спутниковой связи спутник может обеспечить охват всей области Земли, видимой со спутника, с помощью одного луча. В этом случае коэффициент усиления спутниковой антенны будет ограничен шириной луча, так как это накладывается зоной покрытия [2].

В многолучевых системах спутниковой связи спутник обеспечивает охват только части Земли с помощью узкого луча. Преимущество более высокого коэффициента усиления спутниковой антенны достигается за счет уменьшения угла апертуры луча антенны. В результате пользователь с небольшой апертурой антенны может поддерживать высокую скорость трафика. Кроме того, многолучевой метод поддерживает повторное использование частот для различных лучей, чтобы увеличить общую пропускную способность системы. Когда два луча используют одну и ту же частоту, межлучевое взаимодействие вводится в два луча из-за ненулевого усиления бокового лепестка антенны.

Первоначально задача распределения мощности формулируется как нелинейная оптимизация, рассматривающая компромисс между максимизацией общей мощности системы и распределением мощности между лучами. Затем предлагается алгоритм динамического распределения мощности, основанный на теории двойственности, для получения локально оптимального решения задачи оптимизации. По сравнению с традиционными алгоритмами распределения мощности, этот алгоритм улучшает распределение мощности между лучами, и, кроме того, предлагаемый алгоритм также увеличивает общую мощность системы в некоторых сценариях.

Существует метод распределения мощности между несколькими несущими в разных подканалах транспондера. В этом методе задействована проблема применения заранее определенных индивидуальных коэффициентов усиления ретрансляторов, которые используются в спутниковых линиях связи. Проблемы подобного рода возникают

из-за объединения разных антенн восходящего канала в один ретранслятор.

Другой подход рассматривает выбор коэффициентов усиления транспондера. При этом поиск градиента для оптимизации состояния неоднородного усиления использования для поддержки соединения и мощности терминала. Уточненный метод градиентного поиска необходим для оптимальной загрузки спутника. В этой разработке одновременная минимизация мощности спутника и терминала может быть достигнута за конечное число итераций.

В дальнейшем необходимо проанализировать методы, выявить достоинства и недостатки и смоделировать модель усиления спутникового канала связи. Дополнительно необходимо рассмотреть методы перераспределения мощности в ретрансляторах с гибридно-зеркальными антеннами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невдяев Л. Системы спутниковой связи. – Ч. 2: Ракетоносители и космические аппараты // Сети/Network world. – Вып. – № 05-06. – 1999.

2. Heng Wang, Aijun Liu, Xiaofei Pan, and Jiong Li. Optimization of Power Allocation for a Multibeam Satellite Communication System with Interbeam Interference College of Communications Engineering // PLA University of Science and Technology. – No. 2, Yudao Street, Nanjing 210007, China.

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., доцент*

УДК 621.382.2/3

GaAs-МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДВОЙНОГО БАЛАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ С ВЫСОКИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ IP3

В.В. Курикалов, инженер НИИ СЭС;
В.С. Кашина, студентка каф. ТОР
г. Томск, ТУСУР, vera_ny@mail.ru

Предложен метод улучшения параметра IP3 монолитной интегральной схемы двойного балансного смесителя, разрабатываемого на основе диодной технологии АО «НПФ «Микран».
Ключевые слова: МИС смесителя, мост Маршанда, кольцевая схема ДБС смесителя, диод Шоттки, IP3.

Смесители активно применяются в приемных и передающих устройствах разного назначения. В рамках программы импортозамещения возникла задача разработки устройства частного использования отечественным предприятием. Стоит задача оптимизировать методику разработки монолитной интегральной схемы, позволяющей добиться высокого показателя IP3 смесителя.

Одним из самых популярных решений, при проектировании МИС смесителей является кольцевая схема двойного балансного смесителя (ДБС) [1, 2].

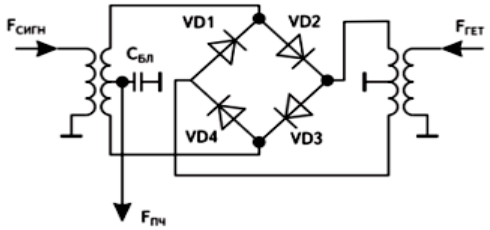


Рис. 1. Кольцевая схема двойного балансного смесителя

На рис. 1 диоды (VD4/VD2 и VD3/VD1) образуют диодное кольцо. Такое встречно-параллельное включение диодов позволяет использовать оба полупериода напряжения сигнала гетеродина: при положительном напряжении ток пропускают диоды VD1 и VD3, а при отрицательном – диоды VD2 и VD4. Мощность, подаваемая на вход гетеродина, служит для вывода диодов в нелинейный режим работы. Продукты смешения частот *LO* и *RF* переносятся на промежуточную частоту *IF*. Функция симметрирующих трансформаторов в такой схеме – разделить сигнал на входе на два сигнала, одинаковые по амплитуде и сдвинутые по фазе на 180° в рабочей полосе частот. Ещё одной функцией симметрирующего трансформатора является функция согласования импеданса между несимметричным входом и симметричными выходами. Наиболее подходящий симметрирующий трансформатор для монолитной интегральной технологии – симметрирующий трансформатор на основе моста Маршанда [3].

Улучшение значения IP3 МИС смесителя, выполненного по кольцевой схеме, можно добиться за счет добавления диодов одновременно в последовательном и параллельном включении. Добавление диодов последовательно увеличивает напряжение на вольт-амперных характеристиках, где ток начинает возрастать, а добавление диодов параллельно увеличивает протекающий ток при том же напряжении. Всё это позволяет увеличить масштаб по токам и напряжениям, за счет чего происходит улучшение линейности. Построены графики диодов в последовательном включении в количестве 1–3 шт. (рис. 2).

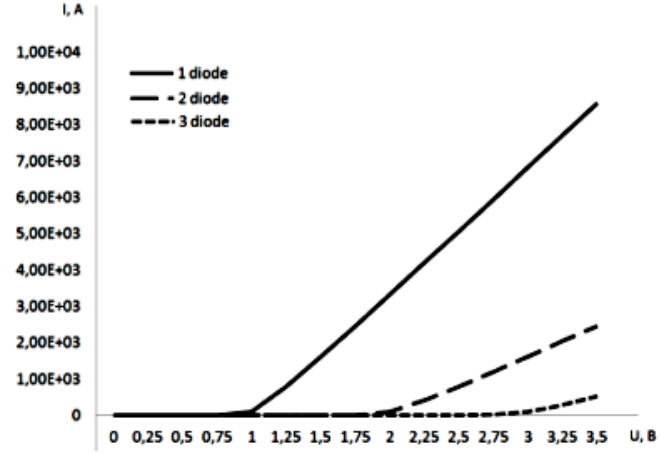


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов в последовательном включении в количестве 1 (сплошна линия), 2 (пунктирная линия) и 3 шт. (точечная линия)

При усложнении диодного кольца возникает задача сохранить импеданс выходов мостов, обеспечивающий максимальный показатель IP3, при этом реализовать согласование входных портов *LO*, *RF* и *IF*. Подбирать компромиссный импеданс на входах и выходах трансформатора можно при помощи разных ширин моста, выбором оптимального зазора между микрополосками, как было предложено в работе [4]. Задачей топологической проработки является размещение трансформаторов общей длиной примерно 3 мкм на кристалле размером 1,5×1,5 мм^2 вместе с остальными элементами схемы. Такой размер выбран из соображений, что изготовленный смеситель будет помещён в корпус МК 5166.12-1. Ограничение по габаритам подразумевает под собой присутствие изгибов мостов Маршанда. Результат разработки топологии дан на рис. 3. Мощность гетеродина 21 дБм, на вход *RF* подается двухтональный сигнал с разницей по частоте 10 МГц, мощность каждой гармоники –10 дБм. Частота *IF* – 100 МГц). Результаты моделирования смесителя представлены на рис. 4–7.

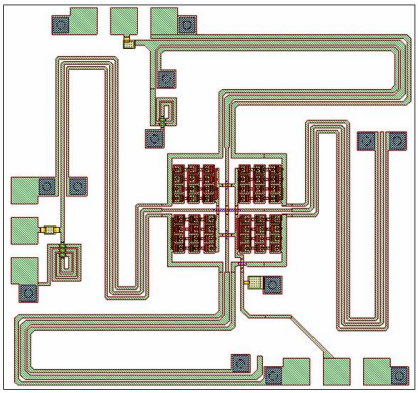


Рис. 3. Топология смесителя, размер кристалла 1,5×1,5 мм^2

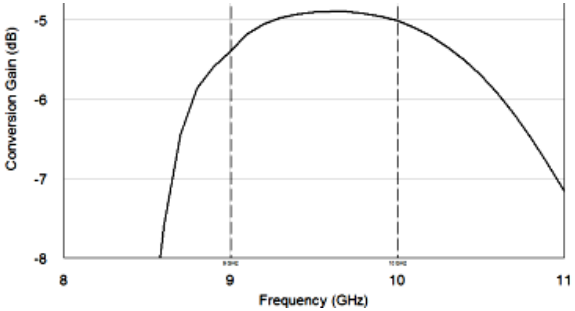


Рис. 4. Потери преобразования смесителя

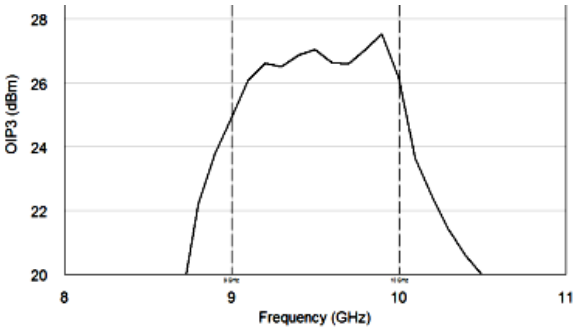


Рис. 5. OIP3 смесителя

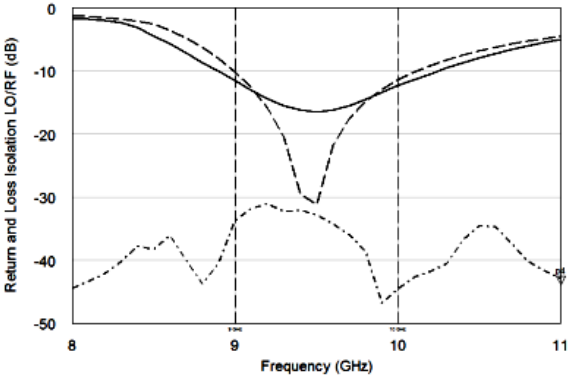


Рис. 6. Согласование портов: сплошная линия – согласование порта *LO*, пунктирная линия – согласование порта *RF*, линия пунктир–точка – изоляция *LO/ RF*

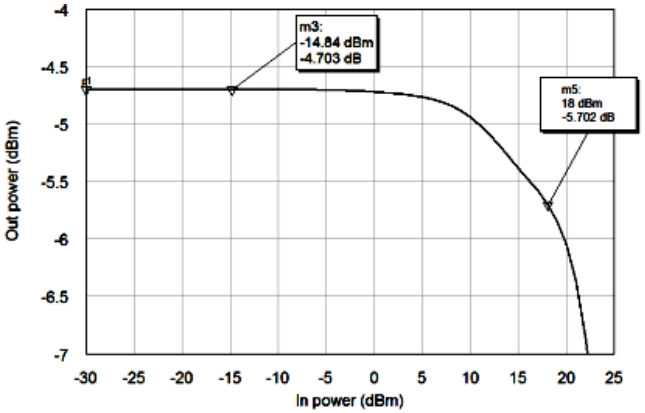


Рис. 7. Точка P1 дБ на частоте 9,5 ГГц

Из графиков на рис. 4–7 видно, что выбранное схемотехническое решение – увеличение количества диодов – позволяет достичь в узкой полосе на этапе моделирования нужных показателей смесителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maas S. Microwave Mixers. – 2nd ed. – Boston: MA:Artech House, 1993.

2. Шевеляков М., Кондратенко А., Карев Е., Штраух А. Обзор схем диодных двойных балансных смесителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-shem-diodnyh-dvoynyh-balansnyh-smesiteley (дата обращения: 20.11.2019).

3. Дроздов А.В., Дроботун Н.Б., Гошин Г.Г., Хорошилов Е.В. Монолитная интегральная схема двойного балансного смесителя диапазона частот 5–26 ГГц // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20, № 1.

4. Дроздов А.В. Интегральные широкополосные умножители и смесители СВЧ на основе GaAs диодов Шоттки: дис. … канд. тех. наук: 05.12. – Томск, 2018. – 137 с.

УДК 53.072.13

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ МОДУЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПЛАСТИКОВЫХ КАРТ

А.А. Арутюнян, К.С. Колесов, студенты каф. КУДР

Научный руководитель С.П. Караульных, преп. каф. КУДР

г. Томск, ТУСУР, arutyunyan18@mail.ru

Картомат – это устройство, позволяющее автоматизировать учет, хранение и выдачу пластиковых карт. Картомат устанавливается в отделениях банка и облегчает работу сотрудников. Устройство состоит из восьми модулей, каждый из которых выполняет определенные функции. Два модуля выполняют функции загрузки и выгрузки и шесть модулей предназначены для хранения, позволяющие перемещать карты. Для стабильной работы картомата необходимо обеспечивать выходной контроль качества составных частей устройства, одной из таких частей является блок транспортировки пластиковых карт.

Ключевые слова: картомат, устройство хранения, транспортировка пластиковых карт.

Операции по учету и хранению пластиковых карт в учреждениях выполняются вручную, что не исключает ошибки, связанной с человеческим фактором. Операции по учету и хранению пластиковых карт требуют временных затрат, что приводит к издержкам в учреждениях [2]. Картомат позволяет повысить качество обслуживания. На рис. 1 представлена фотография картомата.



Рис. 1. Картомат

Блок транспортировки пластиковых карт может перемещать карту по каналу вверх или вниз и помещать или забирать карту с секции хранения.

На рис. 2 представлена модель блока транспортировки пластиковых карт.

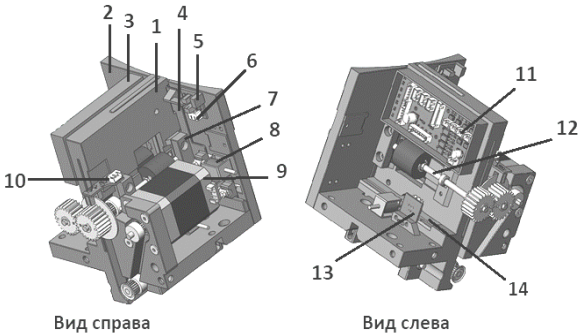


Рис. 2. Блок транспортировки пластиковых карт

Блок транспортировки включает в себя: *1* – основание; *2* – боковая часть модуля транспортировки; *3* – гнездо для печатного узла *11*; *4* – вертикальная заслонка блокировки карты; *5* – поджим для датчика *6*; *6* – датчик состояния вертикальной заслонки блокировки карты; *7* – поджим для вала *12*; *8* – соленоид; *9* – шаговый двигатель; *10* – датчик положения вала; *11* – плата управления модулем; *12* – вал с подшипником, роликом и шестернями; *13* – датчик состояния горизонтальной заслонки блокировки карты; *14* – горизонтальная заслонка блокировки карты.

Макет устройства контроля качества блока транспортировки пластиковых карт позволит выявлять ошибки блоков до их установки на

модуль хранения пластиковых карт. Через верхнее основание испытательного стенда подается пластиковая карта, которая будет с помощью роликов и шагового двигателя передаваться вниз и вверх в течении 30 мин, если во время работы возникнет неисправность, то программное обеспечение выявляет ошибку.

На рис. 3 представлен макет испытательного стенда для контроля качества блока транспортировки пластиковых карт [1].

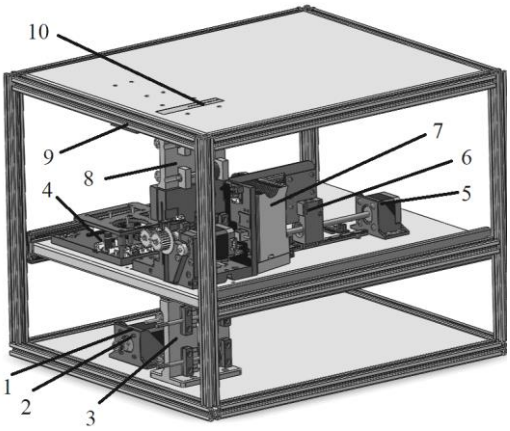


Рис. 3. Макет испытательного стенда для контроля качества блока транспортировки пластиковых карт

Испытательный стенд для блока транспортировки пластиковых карт состоит из трех уровней. На нижнем модуле располагается печатный узел (*1*) для управления стендом, канал проброса карты (*3*) и шаговый двигатель (*2*). На верхнем модуле располагается канал проброса карты (*8*) и шаговый двигатель (*9*). На средний уровень устанавливается шаговый двигатель толкателя (*5*), толкатель (*6*), секция для хранения карты (*7*), печатный узел для управления средним модулем (*4*). Через окно (*10*) подается пластиковая карта. В процессе работы стенд позволяет обеспечить выходной контроль качества составных частей блока транспортировки. Для удобства работы с испытательным стендом были предусмотрены рельсовые направляющие, которые позволяют выдвигать средний модуль для установки блока транспортировки пластиковых карт.

В дальнейшем планируется собрать испытательный стенд и проверить работоспособность блоков транспортировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство для учащихся по изучению программного обеспечения SolidWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ur-l.ru/RJ5Q4 (дата обращения: 20.02.2020).

2. Картомат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ur-l.ru/xszvH (дата обращения: 1.03.2020).

ПОДСЕКЦИЯ 1.3

РАДИОТЕХНИКА

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

УДК 621.372

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ТЕЛЕГРАФНЫХ УРАВНЕНИЙ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

Т.А. Чепко, студентка, каф. КУДР, ЦКП «Импульс»
Научный руководитель Н.Д. Малютин, гл.н.с. НИИСЭС
г. Томск, ТУСУР, ndm@main.tusur.ru

Проведен анализ устойчивости решения телеграфных уравнений, описывающих распространение Т-волн в кусочно-неоднородной полосковой линии.
Ключевые слова: телеграфные уравнения, конечно-разностный метод, устойчивость, погрешность.

В большинстве случаев расчет распространения волн напряжений и токов в полосковых линиях (ПЛ) можно провести аналитически. Однако при анализе неоднородных ПЛ это не всегда возможно из-за наличия сосредоточенных элементов и скачков волнового сопротивления. Поэтому применяются численные методы решения телеграфных уравнений [1–4]. При реализации конечно-разностных методов необходимо выполнение условия устойчивости (1) Куранта–Фредерикса–Леви (КФЛ), сформулированного в [3]:

$$v\frac{\Delta t}{\Delta x} < C, \qquad (1)$$

где v – скорость распространения переноса волны среде; Δx – шаг по координате; Δt – шаг по времени; C – константа, которая в общем случае зависит от уравнения, но не зависит от Δx и Δt.

Цель данной работы состоит в анализе устойчивости решения телеграфных уравнений (2), описывающих волновой процесс в ПЛ:

$$\frac{d}{dx}\begin{bmatrix} U \\ I \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} Z & 0 \\ 0 & Y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I \\ U \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где U, I – напряжение и ток, Z, Y – сопротивление и проводимость линии.

Была исследована кусочно-неоднородная полосковая линия с параметрами: $Lx1 = 0,03$, $Lx2 = 0,08$, $Lx3 = 0,03$ – длины каскадно включенных сегментов с номерами 1, 2 и 3 в м; $C01 = 7,255 \cdot 10^{-11}$, $C02 = 1,579 \cdot 10^{-10}$, $C03 = 1,78 \cdot 10^{-9}$ – погонные емкости сегментов в Ф/м; $L01 = L02 = L03 = 2,604 \cdot 10^{-7}$ – погонные индуктивности в Гн/м.

Прикладной аспект применения условия (1) рассмотрен в работе [4] применительно к двумерным электродинамическим моделям. Рассматриваемая ПЛ является одномерной структурой. Для данного случая условие устойчивости записывается в следующем виде:

$$\omega_{\max} \frac{\Delta x}{v} \le \delta, \qquad (3)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны в среде. Если среда воздушная, то $v = c$, если среда неоднородная, то $v = c/\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}$, где ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородной в поперечном сечении среды, $\omega_{\max}$ – максимальная круговая частота сигнала.

Проведена дискретизация полосковой линии путем разделения на M элементарных отрезков длиной Δx. Рассматривались две конечно-разностные схемы при численном решении уравнений (2). Первая записана при приближенном вычислении первой производной «вперед» (4), вторая определена при вычислении «центральной» производной (5) [5].

$$\begin{bmatrix} U_{k+1} \\ U_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_k \\ U_k \end{bmatrix} - \Delta x \left| \begin{bmatrix} i\omega (L_0)_k I_k \\ i\omega (C_0)_k U_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R_0)_k I_k \\ (G_0)_k U_k \end{bmatrix} \right|, \qquad (4)$$

$$\begin{bmatrix} U_{k+1} \\ U_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{k-1} \\ U_{k-1} \end{bmatrix} - 2\Delta x \left| \begin{bmatrix} i\omega (L_0)_k I_k \\ i\omega (C_0)_k U_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (R_0)_k I_k \\ (G_0)_k U_k \end{bmatrix} \right|, \qquad (5)$$

где Δx – длина «элементарного» отрезка по координате x; k – номер рассматриваемого «элементарного» отрезка; $(L_0)_k$, $(C_0)_k$, $(R_0)_k$, $(G_0)_k$ – погонные параметры «элементарных» отрезков Δx.

Приведенные формулы (4) и (5) позволяют использовать итерационный алгоритм для вычисления зависимости U, I от продольной координаты x. Для проверки устойчивости решения по выражениям (4) и (5) был проведен анализ зависимости U и I от x через вычисление произведения матриц передачи элементарных отрезков по алгоритму, приведенному в работе [1]. На рис. 1 приведены результаты

расчетов зависимости $U(x)$ в сравнении с точным анализом по [1] при следующих параметрах: $M = 500$, $f = 2$ ГГц. На рис. 1 вертикальные линии показывают координаты точек стыковки сегментов ПЛ с разными параметрами.

Из сравнения рис. 1, *а* и *б* видно, что расчет по формуле (4) приводит к потере устойчивости при $M = 500$. Переход к расчету по выражению (5) снимает эту проблему.

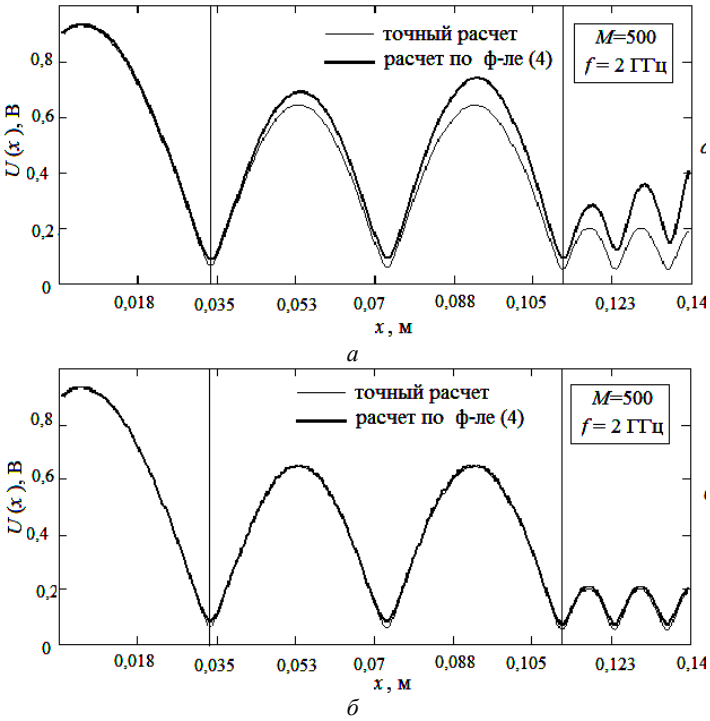


Рис. 1. Сравнение зависмостей эталонно расчитанного напряжения и расчитанного по формуле (4) – *а*; сравнение зависимостей эталонного напряжения и расчитанного по формуле (5) – *б*

Была проведена оценка устойчивости решения и погрешности вычислений в зависимости от числа разбиений ПЛ на элементарные участки *M*. При оценке погрешности бралась разница максимумов напряжений в точках пучности, определенных по формулам (4) и (5), соответственно $U_{\max}^{(4)}$ и $U_{\max}^{(5)}$, и максимумов, получаемых при точ-

ном расчете $U_{\max}^{(T)}$. Рисунок 2 иллюстрирует относительную погрешность вычислений $\delta_{\text{отн}} = \left|U_{\max}^{(4),(5)} - U_{\max}^{(\text{T})}\right| \cdot \left(U_{\max}^{(\text{T})}\right)^{-1}$ разными методами. На рис. 3 приведены зависимости $\delta_{\text{отн}}$ от числа разбиений M отрезка ПЛ.

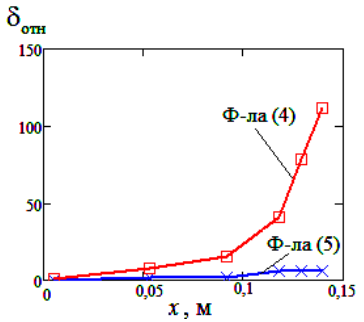


Рис. 2. Сравнение зависимостей относительной погрешности разных методов от координаты

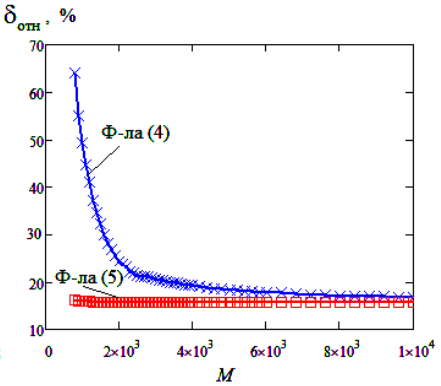


Рис. 3. Сравнение зависимостей относительных погрешностей разных методов от количества точек

Заметим, что при расчете по формуле (4) относительная погрешность сильно зависит от M и почти не зависит от M при вычислении по формуле (5).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Измерения проведены на оборудовании ЦКП «Импульс», проект № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. ID RFMEFI62119X0029.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тренкаль Е.И. Расчетно-экспериментальный метод анализа волн в нерегулярных связанных полосковых линиях с сосредоточенными неоднородностями / Е.И. Тренкаль, Н.Д. Малютин, А.Г. Лощилов, В.Н. Федоров // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 17–25. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-17-25

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617303 / Н.Д. Малютин, Е.И. Тренкаль, А.Г. Лощилов. – Заявка № 2019615886. Дата поступления: 2019 г. – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 5 июня 2019 г.

3. Courant R. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik / R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy // Mathematische Annalen. – 1928. – Vol. 100, № 1. – P. 32–74. IBM Journal, march 1967. web.stanford.edu.

4. Федоров В.Н. Двухмерная электродинамическая модель неоднородной среды с потерями / В.Н. Федоров, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 132–137.

5. Малютин Н.Д., Лощилов А.Г. Алгоритм решения внутренней задачи расчета параметров комбинированных антенн дкмв-диапазона / Электронные средства и системы управления: междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. – Томск, 2004. – С. 99–101.

УДК 621.375.026

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ 3-ГО ПОРЯДКА В СВЧ-УСИЛИТЕЛЯХ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

Д.А. Голов, студент каф. ТОР

Научный руководитель В.Д. Дмитриев, доцент каф. ТОР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, 1965z6987@gmail.com

Рассматривается возможность снизить уровень интермодуляционных искажений третьего порядка в сверхвысокочастотных (СВЧ) усилителях мощности с параллельным включением транзисторов. Снижение уровня интермодуляции третьего порядка происходит за счёт включения транзистора в сильно нелинейном режиме.

Ключевые слова: интермодуляционные искажения, интермодуляционные искажения третьего порядка, СВЧ-усилитель, СВЧ, параллельное включение транзисторов.

Интермодуляционные искажения (ИМИ) возникают в результате взаимодействия нескольких частот в нелинейном элементе. Для оценки уровня ИМИ 3-го порядка используют метод двухчастотного воздействия [1]. В среде AWR Design Environment построен усилитель с центральной частотой 4 ГГц по схеме рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема усилителя

Транзисторы CGH60030D [2] работают в линейном режиме. Входная и выходная согласующие цепи включают в себя цепи питания и рассчитаны на оптимальные импедансы для получения максимальной выходной мощности. На рис. 2 приведём мощностные характеристики усилителя с двумя параллельно включенными транзисто-

рами. При изменении входной мощности от 0 до 42 дБм построим зависимость выходной мощности от входной (треугольный маркер), коэффициент усиления по мощности (квадратный маркер) и КПД (ромбовидный маркер).

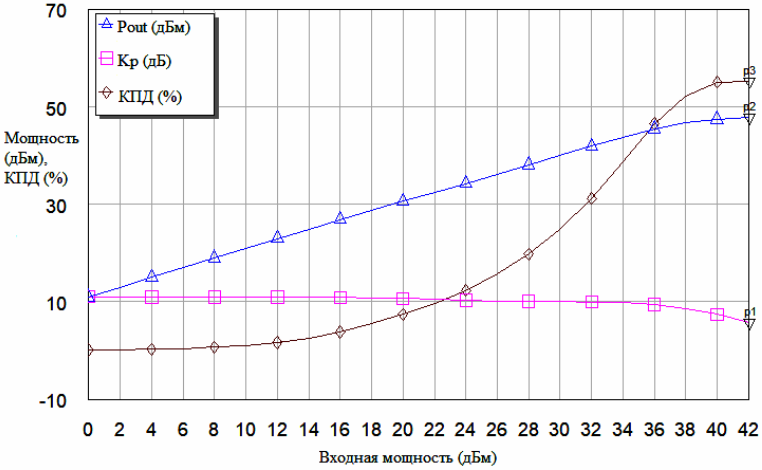


Рис. 2. Мощностные характеристики усилителя с двумя транзисторами

Как можно заметить из данного рисунка, КПД данного усилителя не превышает 50% на линейном участке, коэффициент передачи по мощности в пределах 10 дБ.

Проведём моделирование для определения уровня ИМИ 3-го порядка. Для этого подадим два сигнала с некоторым разносом по частоте (0,5; 1; 2; 5; 10 МГц и т.д.). На рис. 3 отобразим полученные характеристики. Треугольный маркер – уровень ИМИ 3-го порядка, квадратный маркер – уровень выходной мощности.

Данное параллельное включение двух транзисторов [3] позволяет уйти от зависимости уровня ИМИ 3-го порядка при изменении разноса частот.

Теперь параллельно нашим двум транзисторам включим третий маломощный транзистор CGH60008D [4], но режим работы его будет нелинейным. На затворе напряжение питания для данного транзистора будем изменять от –1 до 6 В, а на стоке транзистора отдельно подведено питание, равное 2 В (в нормальном режиме 28 В). В таком включении транзистора предполагается снижения уровня ИМИ 3-го порядка за счёт появления комбинационных составляющих 3-го порядка в противофазе ИМИ составляющим 3-го порядка на выходе усилителей, работающих в линейном режиме. На рис. 4 треугольный

маркер – уровень ИМИ 3-го порядка, квадратный маркер – уровень выходной мощности.

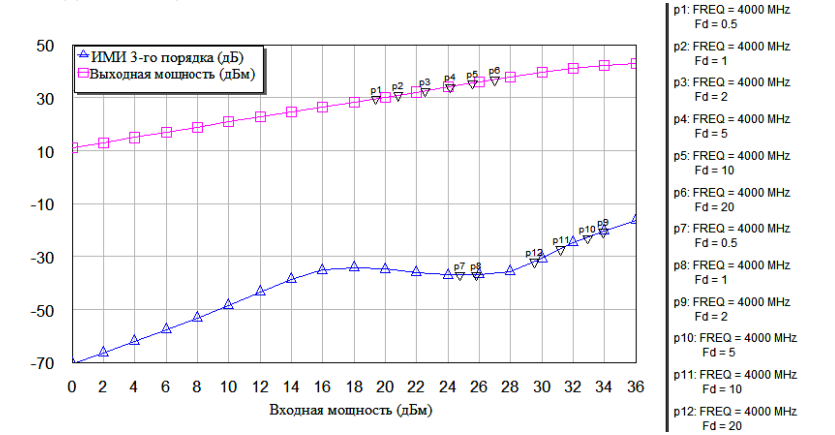


Рис. 3. Характеристики при двухсигнальном воздействии и изменении разноса частот

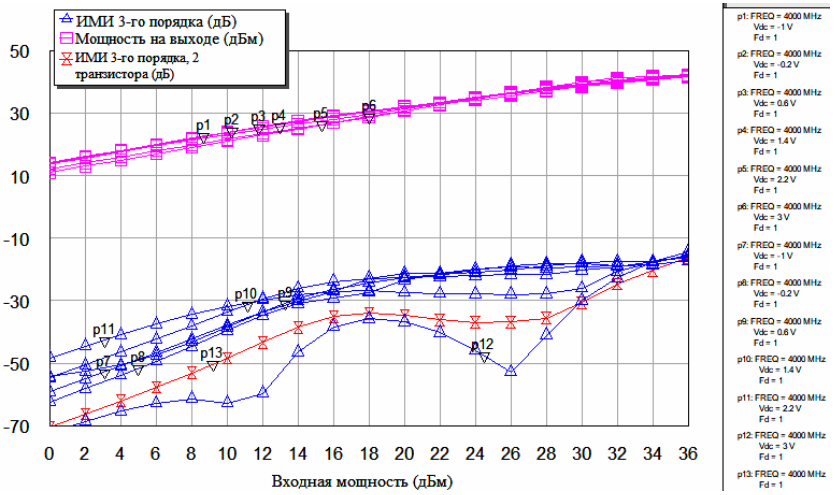


Рис. 4. Характеристики при двухсигнальном воздействии и изменении напряжения смещения

Из данных кривых видно, что при увеличении напряжения смещения на затворе транзистор работает в более нелинейном режиме и появляются провалы по уровням ИМИ 3-го порядка до –70, –50 дБ. В общем же уровень ИМИ снизился на 10–15 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакирев А., Туркин А. Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике // Современная электроника. – 2015. – № 4. – С. 50–170.

2. Datasheet CGH60030D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wolfspeed.com/media/downloads/289/CGH60030D-Rev4-0.pdf (дата обращения: 02.02.2020).

3. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.

4. Datasheet CGH60030D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wolfspeed.com/media/downloads/264/CGH60008D-Rev1_0.pdf (дата обращения: 02.02.2020).

УДК 621.373.072; 621.373.122

РАСЧЁТ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДА ГАННА НА ОСНОВЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.О. Шунин, студент каф. РТС

Научный руководитель В.П. Пушкарев, к.т.н., доцент каф. РТС

г. Томск, ТУСУР, tolikwin@mail.ru

Приведена методика расчёта коэффициентов аппроксимации ВАХ диода Ганна и разработка методики расчёта Т-образной нелинейной динамической модели.

Ключевые слова: диод Ганна, коэффициент аппроксимации, нелинейная динамическая модель.

Цель работы – методика расчёта коэффициентов аппроксимации ВАХ и параметров *Т*-образной нелинейной динамической модели диода Ганна (ДГ) на основе трансцендентных функций на различных участках для использования в системах автоматизированного проектирования устройств и систем радиосвязи (рис. 1) [1].

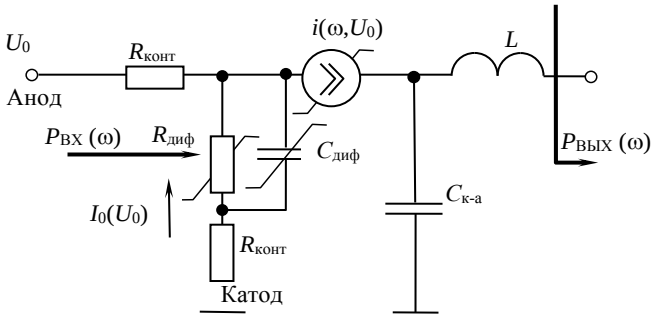


Рис. 1. Нелинейная *Т*-образная модель диода Ганна

Результирующий ток (I_0) определяется суммой токов, протекающих через диод для различных участков ВАХ (см. рис. 1) [1]:

$$I_0 = Q \cdot [I_1 + I_2 + I_3 + I_4],$$

где $I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ – токи ДГ для различных участков ВАХ.

$$I_1(U_0) = A \cdot U_0 \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_1}};\ I_2(U_0) = B \cdot U_0 \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_2}};$$

$$I_3(U_0) = C \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_3}} - 1;\ I_4(U_0) = D \cdot (e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_4}})^n,$$

где $\varphi_T = (k \cdot T)/q$ – температурная разность потенциала; $A[1/\text{Ом}]$; $B[1/\text{Ом}]$; $C[1/\text{Ом}]$; $D[A]$ – коэффициенты аппроксимации; k = 1,38·10^{-23} – коэффициент Больцмана; T – температура окружающей среды, К; $m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ – коэффициенты изменения температуры носителя зарядов полупроводника на различных участках ВАХ; q = 1,6·10^{-19} – заряд электрона; Q – скважность импульсов тока (Q = 1 – режим непрерывной генерации; $Q = T_{\text{след}} / \tau_{\text{имп}}$ (700…2000 – для квазихолодного режима импульсной генерации).

Коэффициенты аппроксимации определяются эмпирическими выражениями:

$$A = X_1 \frac{1}{e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_1}}};\ B = X_2 \frac{1}{U_П \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_2}}};\ C = X_3 \frac{1}{e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m3}} - 1};\ D = X_4 \left(\frac{1}{e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_4}} - \sqrt{1}}\right)^n,$$

n – коэффициент лавинного процесса электрического, теплового и механического пробоя (для GaAs n = 5); X_1, X_2, X_3, X_4 – отношение уровней тока к напряжению ВАХ, которые и требуется найти.

Мощность СВЧ-колебания определяется спадающим участком ВАХ

$$P(U_0) = \begin{cases} 0{,}5 \cdot \left[i(\omega, U_0) \right]^2 \cdot \left| R_{\text{диф}}(U_0) \right|, & R_{\text{диф}}(U_0) \le 0, \\ 0, & R_{\text{диф}}(U_0) > 0, \end{cases}$$

где $R_{\text{диф}} = 2R_{\text{ДГ}} - \Delta U / \Delta I$ – дифференциальное сопротивление ДГ.

Характер зависимости $P(U_0)$ для диодов Ганна одинаков. Коэффициенты аппроксимации совпадают с коэффициентами ВАХ.

Коэффициенты A, B и C определяются как проводимости в экстремальных точках ВАХ [2]:

$$A = \frac{1}{U_1 / I_1} \frac{1}{U_П \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_1}}};\ B = \frac{1}{U_2 / I_2} \frac{1}{U_П \cdot e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m_2}}};\ C = U_3 / I_3 \cdot \frac{1}{e^{-\frac{U_П}{\varphi_T \cdot m3}} - 1}.$$

Коэффициент D определяет лавинный процесс в ДГ (10^{-5} А).

Проводимости ДГ аппроксимируются рядом Тейлора:

$$g1(U_{\Pi}) = \frac{1}{R_{\text{диф}}(U_{\Pi})};\ g2(U_{\Pi}) = \frac{g1(U_{\Pi})^2}{2 \cdot I_{\text{ДГ}}(U_{\Pi})};\ g3(U_{\Pi}) = \frac{g1(U_{\Pi})^3}{6 \cdot I_{\text{ДГ}}(U_{\Pi})^2}.$$

В результате моделирования получены характеристики с зависимостью проводимости от напряжения (рис. 2).

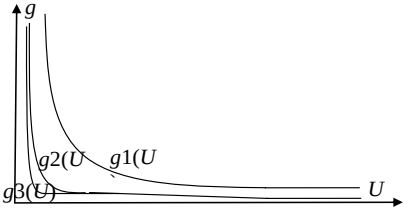


Рис. 2. Зависимость проводимости ДГ от напряжения

Частота генерации диода определяется динамической емкостью диода. Динамическая емкость, представляемая рядом Тейлора третьего порядка, имеет вид

$$Cg1 = \frac{g1(U_{\Pi})}{\omega(U_{\Pi})};\ \ Cg2 = \frac{g2(U_{\Pi})}{\omega(U_{\Pi})};\ \ \ Cg3 = \frac{g3(U_{\Pi})}{\omega(U_{\Pi})},$$

где $\omega(U_{\Pi})$ – круговая частота генерации, определяется методом наименьших квадратов [2].

Результаты расчета динамической ёмкости представлены на рис. 3.

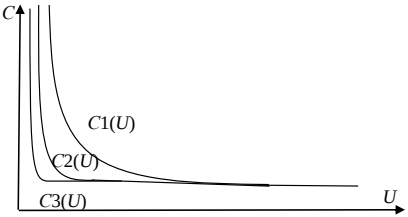


Рис. 3. Сумма дифференциальной и конструктивной емкости диода Ганна первого, второго и третьего порядков

Вышеприведённая методика позволяет представить ТТХ реальных диодов для автоматизированного проектирования в условиях производства радиоэлектронной аппаратуры. Значение коэффициентов аппроксимации для СВЧ- и КВЧ-диодов представлено в таблице.

Результаты подтверждены экспериментальными исследованиями СВЧ-генераторов импульсных и непрерывных колебаний (при мощ-

ности 16 Вт для диодов сантиметрового диапазона, при мощности 0,35 Вт – для диодов миллиметрового диапазона длин волн).

Значение коэффициентов аппроксимации ДГ

Тип ДГ	A, см	m_1, б/р	B, см	m_2, б/р	C, А	m_3, б/р	D, А	m_4, б/р
Сантиметровый диапазон								
3А750Г (имп.)	6,5	140	1,2	800	0,39	700	10^{-5}	145
3А735Г (непр.)	0,65	70	0,22	100	0,15	220	10^{-5}	50
Миллиметровый диапазон								
АА768А (непр.)	0,115	45	0,03	90	0,0052	90	10^{-5}	16

ЛИТЕРАТУРА

1. Пушкарев В.П. Диоды Ганна в радиолокационных устройствах и системах: видеолекция фонда развития аэронавигации им. Г.Н. Пирогова. – Челябинск, 2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://air-navigation.org/video/c016sw (дата обращения: 7.03.20).

2. Шунин А.О. Диоды Ганна сантиметрового и миллиметрового диапазонов для гетеродинов мобильных устройств: бакалаврская работа по направлению 11.03.02. – Томск, 2018. – 44 с.

УДК 621.3

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОСНОВОПОЛАГАЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ, НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Е.Д. Тихонова, магистрант каф. микро- и наноэлектроники
Научный руководитель Е.С. Горнев, проф.
каф. микро- и наноэлектроники МФТИ, д.т.н.
г. Долгопрудный, МФТИ, yelena.tikhonova@phystech.edu

Разработана модель биполярного транзистора, учитывающая саморазогрев транзистора и флуктуацию напряжения питания, для исследования факторов, ухудшающих амплитудно-фазовую стабильность СВЧ-усилителей. Для компенсации амплитудно-фазовой нестабильности была предложена система, способная сбалансировать девиацию амплитуды и фазы импульсов в зависимости от расстановки импульсов.

Ключевые слова: амплитудно-фазовая стабильность, СВЧ-усилитель мощности, импульсный усилитель мощности, саморазогрев транзистора, селекция движущихся целей.

Современные радиолокационные станции (РЛС) для подавления сигналов от неподвижных целей используют механизм селекции движущихся целей (СДЦ). Данный механизм использует фильтр, который

сравнивает несколько последовательных радиоимпульсов, отраженных от цели, и, если амплитуды и фазы импульсов совпадают, сигнал от этих целей не учитывается. Для корректной работы СДЦ необходимо, чтобы амплитуды и фазы радиоимпульсов с выхода передатчика совпадали [1]. Для определения критерия годности ввели параметр, определяющий влияние на СДЦ флуктуации амплитуды и фазы радиоимпульсов, – амплитудно-фазовую стабильность [2].

Факторы, ухудшающие амплитудно-фазовую стабильность, можно разделить на две категории – детерминированные и недетерминированные. К детерминированным факторам относятся факторы, влияние которых можно описать функцией, зависящей от расстановки радиоимпульсов. Влияние недетерминированных факторов не зависит от расстановки радиоимпульсов.

В данной работе для теоретического исследования зависимости амплитудно-фазовой нестабильности от детерминированных факторов была разработана модель биполярного транзистора на основе базовой модели [3]. Данная модель позволяет учитывать два основных фактора, влияющих на стабильность, – саморазогрев транзистора и флуктуацию напряжения питания.

Расчет амплитудно-фазовой стабильности производится путем накопления массива амплитуд и фаз радиоимпульсов и дальнейшего комплексного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) данного массива, результат ДПФ показан на рис. 1. Амплитудно-фазовой стабильностью является отношение амплитуды основной гармоники к амплитудам остальных гармоник.

Для расчета была использована модель биполярного транзистора со следующими параметрами: импульсная выходная мощность – не менее 200 Вт, напряжение питания – 41 В, входная импульсная мощность – 35 Вт, максимальная рабочая длительность импульса – 300 мкс, минимальная скважность – 10.

Для компенсации детерминированных факторов возможно использование физических систем моделирования ухода фазы и амплитуды в зависимости от расстановки импульсов, поскольку воздействие детерминированных факторов на усилитель можно описать при помощи нескольких последовательно соединенных RC-цепочек. Данная система, управляя фазовращателем и системой корректировки амплитуды, может компенсировать девиацию амплитуды и фазы импульсов, обусловленную детерминированными факторами.

Компенсация недетерминированных факторов возможна только в системе цифровой обработки сигналов (ЦОС) РЛС. В момент передачи радиоимпульсов происходит запись данных сигналов при помощи дополнительного приемника и системы ЦОС. Далее при приеме отраженных радиоимпульсов происходит компенсация принимаемых им-

пульсов в соответствии с заранее записанными посылаемыми радиоимпульсами.

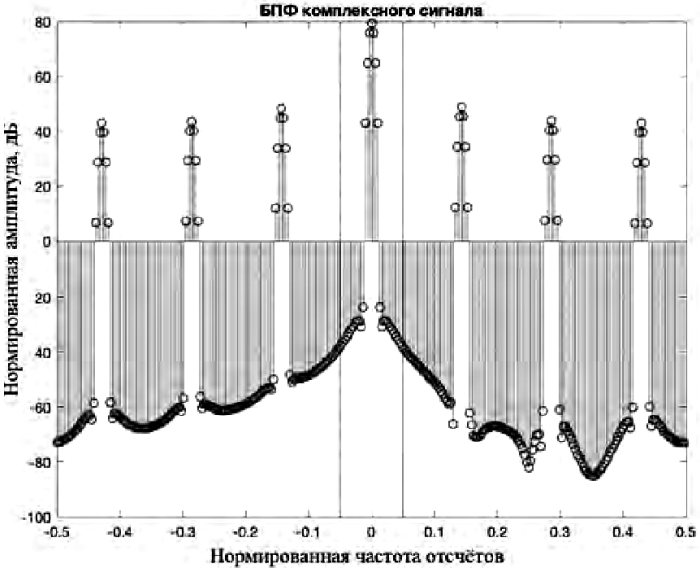


Рис. 1. Результат преобразования Фурье комплексного массива

Для обеспечения корректной работы системы СДЦ необходимо предъявлять требования к источнику питания. Для обеспечения стабильности не менее 50 дБ флуктуация напряжения питания должна быть менее 100 мВ в линейном режиме работы транзистора и менее 50 мВ в режиме насыщения. Также для обеспечения стабильности более 50 дБ импульсное тепловое сопротивление транзистора, модель которого использовалась в расчетах, должно быть не более 1 К/Вт.

Таким образом, в данной работе была продемонстрирована новая модель биполярного транзистора, позволяющая учитывать основные факторы, влияющие на амплитудно-фазовую стабильность. Также впервые была предложена система компенсации амплитудно-фазовой стабильности в составе оконечного усилителя мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скольник М.И. Справочник по радиолокации. – Кн. 1. – 2015. – С. 38–61.

2. Salmer C., Eudeline P.H., Rolland P.A. Pulse to pulse stability of solid state transmitter module for radars application // 28th European Microwave Conference. – IEEE, 1998. – Vol. 2. – P. 79–84.

3. Аронов В.Л., Евстигнеев А.А. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учетом квазинасыщения // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2005. – Вып. 1–2. – С. 24–33.

ПОДСЕКЦИЯ 1.4

АУДИОВИЗУАЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЙ СЕРВИС

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

УДК 004.932.2

АДАПТИВНАЯ МЕДИАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Т.М. Акаева, студентка каф. ТУ
Научный руководитель Е.В. Зайцева, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ttnakaeva@gmail.com

Проведены разработка функции адаптивной медианной фильтрации изображений, а также сравнение встроенной и разработанной функции.
Ключевые слова: фильтрация, медиана, метод пузырька, медианная фильтрация.

В современном мире существуют различные способы создания, передачи и обработки изображений. Однако мало кто задумывается о том, что используемое изображение при различных действиях с ним может быть ухудшено визуально, что приводит к появлению различных шумов.

Цифровой шум, в свою очередь, представляет собой случайно расположенные элементы растра (точек), которые имеют размеры, близкие к размеру пикселя. Шум выделяется на изображении светлыми или темными оттенками (яростный шум) или по цвету (хроматический) [1]. Так, шумы подразделяются на аддитивный и импульсный.

Существует очень много способов ослабления уровня шума [2]. Одним из самых распространенных методов нелинейной обработки изображений является медианная фильтрация, которая эффективно борется с импульсными шумами. Работа ее осуществляется посредством движения апертуры вдоль изображения и замены центрального значения апертуры его медианной, исходя из чего получается более гладкое результирующее изображение [3]. Разработка функции меди-

анной фильтрации осуществлялась согласно алгоритму, представленному на рис. 1.

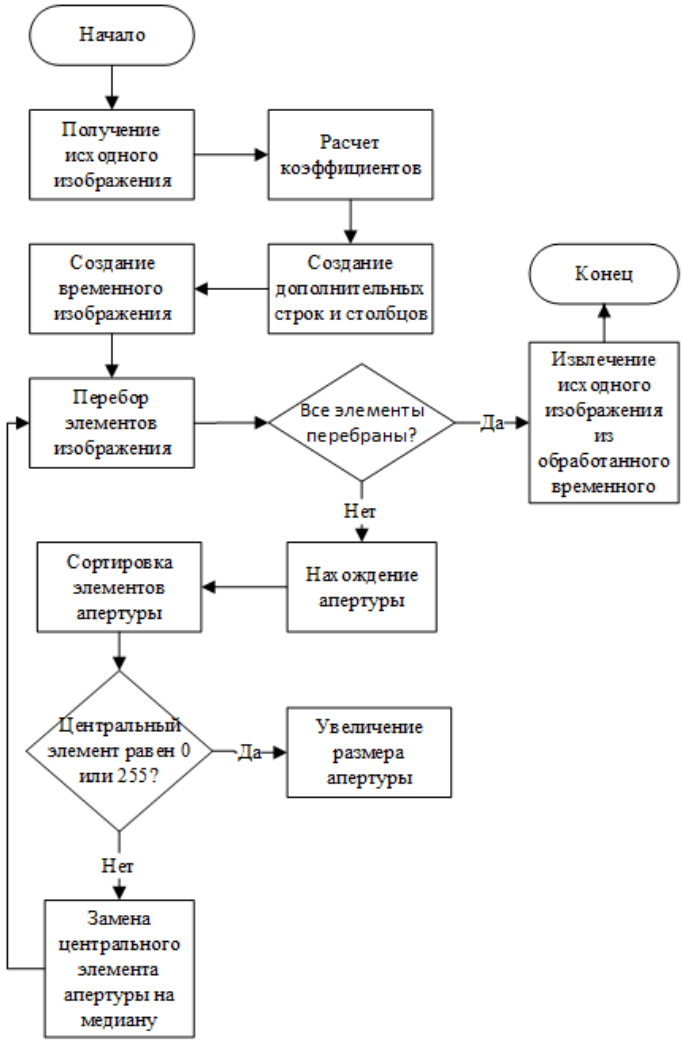
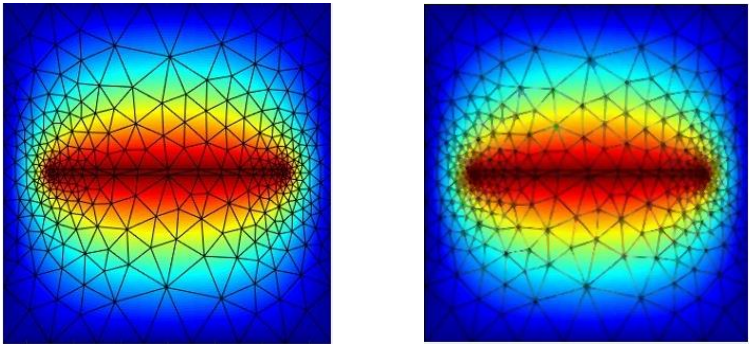


Рис. 1. Блок-схема разработанной функции

Для тестирования разработанной функции адаптивной медианной фильтрации было выбрано изображение, обработанное шумом «Соль-перец», и произведена фильтрация.



а *б*

Рис. 2. Исходное (*а*) и обработанное разработанной функцией (*б*) изображение

Для определения качества изображения используется среднеквадратичное отклонение по формуле

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} \left| M_0(i,j) - M(i,j) \right|^2},$$

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

$$PSNR = 10 \lg\left(\frac{MAX^2}{MSE} \right),$$

где MSE – среднеквадратичное отклонение.

Результаты определения качества обработанного изображения, а также результаты определения зашумленного и обработанного встроенной функцией представлены в таблице.

Расчет MSE и PSNR для изображений

Вид изображения	MSE	PSNR
Зашумленное	0,0661	71,7265
Обработанное встроенной функцией	0,0324	77,9223
Обработанное разработанной функцией	0,0546	73,3889

Таким образом, исходя из данных таблицы, можно сделать вывод, что разработанный алгоритм функции обрабатывает изображение от импульсного шума, но недостаточно хорошо. Данный алгоритм в дальнейшем будет усовершенствован.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровой шум изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.photomanual.ru/articles/noise/ (дата обращения: 26.09.2019).

2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.technosphera.ru/files/book_pdf/0/book_311_455.pdf (дата обращения: 21.03.2020).

3. Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений // Радио и связь. – 1984. – С. 181–189.

УДК 004.31

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ NVIDIA CUDA

Г.Е. Эдель, студент

Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, german.edel99@gmail.com

Представлен обзор Nvidia CUDA, в каких областях применяется данная разработка и каким потенциалом она обладает. Также статья содержит информацию о библиотеках глубокого обучения и т.д.

Ключевые слова: CUDA, глубокое обучение, графические процессоры.

CUDA (изначально аббр. от англ. Compute Unified Device Architecture) – это параллельная вычислительная платформа и программная модель, разработанная компанией Nvidia для общих вычислений на собственных GPU (графических процессорах). CUDA позволяет разработчикам ускорить вычислительные приложения за счет использования мощности графических процессоров для распараллеливаемой части вычислений.

В то время как есть конкурентоспособные графические процессоры от других компаний, таких как AMD, комбинация CUDA и Nvidia GPU доминирует в нескольких областях применения, включая глубокое обучение, и является основой для некоторых из самых быстрых компьютеров в мире.

Графические процессоры CUDA и Nvidia были приняты во многих областях, где требуется высокая производительность вычислений с плавающей запятой. Более полный список:

- Вычислительные финансы.
- Моделирование климата, погоды и океана.
- Наука о данных и аналитика.
- Глубокое обучение и машинное обучение.
- Оборона и разведка.
- Производство.

- Средства массовой информации и развлечения.
- Медицинская визуализация.
- Нефть и газ.
- Научные исследования: суперкомпьютер (включая вычислительную химию и биологию, численную аналитику, физику и научную визуализацию).
- Охрана и безопасность.
- Инструменты и управление.

CUDA в глубоком обучении. Глубокое обучение имеет огромную потребность в скорости вычислений. Например, для обучения моделей для Google Translate в 2016 г. команды Google Brain и Google Translate выполнили сотни однонедельных запусков TensorFlow с использованием графических процессоров. Они купили 2000 серверных графических процессоров от Nvidia для этой цели. Без графических процессоров эти тренировочные пробеги заняли бы месяцы, а не неделю, чтобы сходиться. Для производственного развертывания этих моделей перевода TensorFlow Google использовал новый пользовательский чип обработки – TPU (тензорный блок обработки).

В большинстве случаев они используют cuDNN (библиотека для глубоких нейросетевых вычислений). Эта библиотека настолько важна для обучения фреймворков глубокого обучения, что все фреймворки, использующие данную версию cuDNN, имеют практически одинаковые показатели производительности для эквивалентных случаев использования. Когда CUDA и cuDNN улучшаются от версии к версии, все платформы глубокого обучения, которые обновляются до новой версии, видят прирост производительности. Где производительность имеет тенденцию отличаться от фреймворка к фреймворку, так это в том, насколько хорошо они масштабируются до нескольких графических процессоров и нескольких узлов.

Инструментарий CUDA включает библиотеки, средства отладки и оптимизации, компилятор, документацию и библиотеку времени выполнения для развертывания приложений. Он имеет компоненты, которые поддерживают глубокое обучение, линейную алгебру, обработку сигналов и параллельные алгоритмы. В целом библиотеки CUDA поддерживают все семейства графических процессоров Nvidia, но лучше всего работают на последнем поколении, таком как V100, который может быть в 3 раза быстрее, чем P100, для рабочих нагрузок глубокого обучения. Использование одной или нескольких библиотек является самым простым способом воспользоваться преимуществами графических процессоров, если необходимые алгоритмы реализованы в соответствующей библиотеке.

Библиотеки глубокого обучения CUDA. В сфере глубокого обучения есть три основные библиотеки с ускорением GPU: cuDNN, который упоминался ранее в качестве компонента GPU для большинства платформ глубокого обучения с открытым исходным кодом; TensorRT, который является высокопроизводительным оптимизатором и средой выполнения вывода NVIDIA; и DeepStream, библиотека видеоинтерпретации. TensorRT помогает оптимизировать нейросетевые модели, выполнять калибровку точности и развертывать обученные модели в центрах обработки данных, встроенных системах или платформах.

CUDA линейная алгебра и математические библиотеки. Линейная алгебра лежит в основе тензорных вычислений и, следовательно, глубокого обучения. BLAS (основные подпрограммы линейной алгебры), набор матричных алгоритмов, реализованных в Fortran в 1989 г., с тех пор используется учеными и инженерами. cuBLAS – это ускоренная версия BLAS для GPU и самый высокопроизводительный способ выполнения матричных арифметических операций с графическими процессорами. cuSPARSE обрабатывает разреженные матрицы.

Библиотеки обработки сигналов CUDA. Быстрое преобразование Фурье (FFT) является одним из основных алгоритмов, используемых для обработки сигналов, он превращает сигнал (например, звуковой сигнал) в спектр частот. cuFFT – это FFT с GPU-ускорением.

Библиотеки параллельных алгоритмов CUDA. Все три библиотеки для параллельных алгоритмов имеют различные цели. NCCL (библиотека коллективных коммуникаций Nvidia) предназначена для масштабирования приложений на нескольких графических процессорах и узлах; nvGRAPH – для параллельной графической аналитики; Thrust – это библиотека шаблонов C ++ для CUDA, основанная на стандартной библиотеке шаблонов C++. Thrust предоставляет богатую коллекцию параллельных примитивов данных, таких как сканирование, сортировка и уменьшение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт Nvidia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nvidia.com/ru-ru/ (дата обращения: 05.03.2020).

2. Боресков А.В., Харламов А.А., Марковский Н.Д. и др. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA. – 2015. – 336 с.

3. Masters T., Deep Belief Nets in C++ and CUDA C: Vol. 1: Restricted Boltzmann Machines and Supervised Feedforward Networks. – 2015. – 244 p.

4. Сандерс Д., Кэндрот Э. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров. – 2011. – 230 с.

УДК 004.932.4

АНАЛИЗ ПРЕДОБРАБОТКИ И АУГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ

Т.Ю. Гребёнкина, В.А. Куракин, студенты
Научный руководитель Е.В. Зайцева, доцент каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, katerinka_zev@mail.ru

Представлены возможности использования программного пакета Scilab для предобработки и аугментации изображений для поиска и распознавания дорожных знаков.
Ключевые слова: аугментация, предобработка, изображение, шум, дорожный знак.

В настоящее время поиск и распознавание дорожных знаков являются актуальной задачей. Аугментация изображений и создание модели распознавания в целом способны повысить безопасность процесса дорожного движения, а также помогают водителю следить за окружающей дорожной обстановкой.

Поскольку в итоге подразумевается обучение модели и сети целиком – используется аугментация. Необходимо создание базы снимков дорожных знаков для дальнейшего аугментирования изображений.

Для аугментации выбираются те ситуации и условия, которые могут происходить в реальной жизни в процессе дорожного движения, например, различные условия освещенности, осадки и т.д.

Целью данной работы является предобработка изображений дорожных знаков, для получения их снимков при различных внешних условиях для дальнейшего обучения модели распознавания дорожных знаков.

Предобработка изображений. В процессе движения автомобиля могут возникать различные ситуации, которые могут искажать дорожные знаки. Для имитации возможных ситуаций изображения знаков были обработаны в программном пакете Scilab. Рассмотрим способы обработки на примере дорожного знака «Движение запрещено». Имеется изображение знака размером 48x48 пикселей в формате png.

При съемке в различных световых условиях снимки дорожных знаков могут получаться разными в зависимости от направления естественного света, так, например, при съемке против света, снимок может получиться затемненным. Это создает дополнительную трудность при распознавании дорожного знака. При помощи пакета Scilab создан код обработки для имитации затемненного снимка. Для этого необходимо имеющееся изображение загрузить в Scilab и обработать,

используя функцию вычитания из изображения постоянной. Ниже представлен код обработки и его результат (рис. 1).

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
b=imsubtract(a,100).
```



Рис. 1. Изображение дорожного знака «Движение запрещено» при съемке против света

В условиях слишком яркого освещения снимок дорожного знака может получиться слишком ярким, засвеченным, детали будут заслонены и создадутся резкие тени. Чтобы имитировать данную ситуацию, загруженное изображение обрабатывается посредством наложения на него «шума Гаусса». Код обработки и его результат (рис. 2) представлены ниже.

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
m=0.5;
s=0.01;
b=imnoise(a,'gaussian',m,s).
```



Рис. 2. Засвеченное изображение дорожного знака «Движение запрещено»

Дорожный знак, который был снят на большом расстоянии от движущейся машины, может получиться нечётким и размытым. Имитировать данное искажение в Scilab позволяет фильтрация «скользящим средним». Ниже представлен код обработки и его результат (рис. 3).

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
c=1/64*ones(8,8);
d=imfilter(a,c).
```



Рис. 3. Изображение дорожного знака «Движение запрещено» при съемке издалека

Распознавание дорожных знаков требуется, как в светлое, так и в темное время суток. Одним из примеров съемки знаков может быть съемка в сумерках, когда видимость ограничена и затруднено распознавание отсутствием достаточного освещения. При съемках в сумерках изображение знака получится в синих тонах. Пример изображе-

ния, которое может получиться при съемке в сумерках, представлен на рис. 4. Оно получено путем изменения в матрице компонентов, отвечающих за красный, зеленый и синий цвета.

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
r=a(:,:,1);
g=a(:,:,2);
b=a(:,:,3);
r2=-r;
g2=210+g;
b2=255+b;
n=cat(3,r2,g2,b2).
```



Рис. 4. Изображение дорожного знака «Движение запрещено» при съемке в сумерках

Распознавание дорожных знаков происходит в процессе движения автомобиля. Это также может являться одним из факторов, создающих трудность в распознавании знака. Движение автомобиля является причиной того, что снимки могут получиться смазанными. Код обработки и его результат (рис. 5) представлены ниже.

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
hsize=15;
filter = fspecial('average',hsize);
d=imfilter(a,filter).
```



Рис. 5. Изображение дорожного знака «Движение запрещено», снятое в движении

Не только движение автомобиля и условия освещенности могут влиять на качество полученных снимков дорожных знаков. Существуют и погодные условия, которые также могут осложнить процесс распознавания знаков. Как пример, снимок дорожного знака, полученный при дожде или снегопаде. В пакете Scilab данное погодное условие было сымитировано при помощи добавления на изображение дорожного знака шума «salt&pepper». Зависимость искажения дорожного знака на снимке от плотности идущего снега, в данном случае имитации этого погодного условия, можно регулировать коэффициентом. Здесь коэффициент – 0,3. Пример изображения, которое может получиться при съемке во время дождя или снегопада, представлен на рис. 6.

Код обработки:

```
a=imread('znak.png');
b=imnoise(a,'salt & pepper',0.3);
```



Рис. 6. Изображение дорожного знака «Движение запрещено» при съемке во время снегопада или дождя

Заключение. В программном пакете Scilab были написаны коды для обработки изображений. Данные коды являются в своей степени имитацией различных внешних условий среды, которые могут возникать в процессе дорожного движения.

Обработка изображений в программном пакете Scilab с учетом возможных условий, которые могут оказывать влияние на качество и результат полученного снимка, проводилась на примере дорожного знака «Движение запрещено». Они могут использоваться для обучения модели и сети распознавания знаков в процессе дорожного движения. По кодам, созданным в пакете Scilab, также могут быть предобработаны и другие дорожные знаки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Якимов П.Ю. Предварительная обработка цифровых изображений в системах локализации и распознавания дорожных знаков // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, №3. – С. 401–405.

2. Елизаров Д.А. Разработка системы распознавания дорожных объектов // Омский научный вестник. – 2017. – № 4. – С. 120–123.

УДК 621.397

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ЦВЕТЕ ПРИ БИНАРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ТАЙМ-КОДА ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ

О.А. Нейфельд, студент каф. ЭМИС;
А.С. Рудникович, аспирант каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, olegneyfeld@gmail.com

Исследовалась возможность применения алгоритма бинаризации, выделяющего текст на основе указанного цвета, в качестве предобработки изображений с целью повышения качества распознавания тайм-кода. Выполненные с использованием DiViLab и разработанного программного модуля эксперименты показали, что основной проблемой, осложняющей предобработку, является неоднородность по цвету символов тайм-кода, а также схожесть фона с цветом текста. Для корректного выделения тайм-кода на изображении необхо-

димо учитывать не только цвет, но и другие отличительные параметры текста.
Ключевые слова: техническое зрение, распознавание текста, бинаризация изображений, OCR Tesseract, DiViLab.

Для повышения эффективности производственного процесса применяется автоматизация на основе обработки видеоизображений. Одной из задач, которые в этом случае решаются, является распознавание какого-либо текста на изображении. Этим текстом может быть номер вагона железнодорожного состава, автомобильный номер, показания приборов, число на знаке, ограничивающем скорость, номер кредитной карты и проч.

В этом широком перечне имеет место распознавание на видеоизображениях тайм-кода – цифровых данных о времени, встроенных в изображения видеоряда. Распознавание тайм-кода актуально для автоматизации отдельных процедур видеотехнических экспертных исследований. Например, распознавание тайм-кода по изображениям позволяет уточнить истинную частоту кадров исходной видеозаписи для расчета длительности событий или скоростей движения объектов наблюдения. Кроме того, такая дополнительная информация позволяет повысить точность автоматического определения дубликатов кадров или выявления пропущенных кадров на видеорядах со статичными сценами.

На данный момент в сфере распознавания текста уже имеются некоторые готовые решения. Одним из них является optical character recognition (OCR) библиотека Tesseract [1]. В авторской работе [2] опытным путём установлено, что библиотека Tesseract пригодна для распознавания тайм-кода по видеоизображениям. Однако результаты исследования показали, что для эффективного применения библиотеки к видеоданным требуется специальная предобработка видеоизображений. Исходя из описания библиотеки [3], а также опыта её использования, сделан вывод о том, что максимальной эффективности распознавания можно добиться при использовании черно-белого изображения, где черные пиксели представляют текст, а белые – остальную часть изображения. Соответственно в качестве предобработки должны применяться бинаризация и другие методы, позволяющие выделить текст в различных условиях.

Большинство методов бинаризации эффективно работают при достаточном уровне контраста на изображениях без «сложного» фона, где текст ярко выделяется. В остальных случаях в результате предобработки будут присутствовать артефакты, создающие трудности для распознавания текста, или же наоборот могут отсутствовать фрагмен-

ты символов текста, что также ухудшает результаты распознавания. Исходя из всего вышесказанного, сформулирована задача для повышения качества распознавания тайм-кода: реализовать максимально простой алгоритм бинаризации, учитывающий специфику задачи видеотехнических исследований и возможности интерфейса программного обеспечения.

Анализируя видеозаписи, содержащие тайм-код, сделан вывод, что одним из его ключевых отличительных признаков относительно остальных компонентов изображения является цвет. На основании этого реализован алгоритм бинаризации, принцип работы которого описан ниже:

- перед началом работы алгоритма задается цветовой диапазон указанием основного цвета текста и возможного от него отклонения в процентах;
- далее цвет каждого пикселя сверяется с заданным цветовым диапазоном;
- пиксель считается принадлежащим указанному цветовому диапазону, если значения всех компонент его цвета (красный, зелёный, синий) удовлетворяют условию (1):

$$c_m - \frac{255 \cdot deviation}{100\%} < c < c_m + \frac{255 \cdot deviation}{100\%}, \qquad (1)$$

где c_m – значение компоненты основного цвета; *deviation* – возможное отклонение от основного цвета в процентах; c – значение компоненты цвета оцениваемого пикселя;

- если цвет текущего пикселя кадра принадлежит указанному цветовому диапазону, то он закрашивается в чёрный цвет, иначе в белый.

Результат работы алгоритма представлен на рис. 1. В качестве основного цвета выбран цвет тайм-кода.

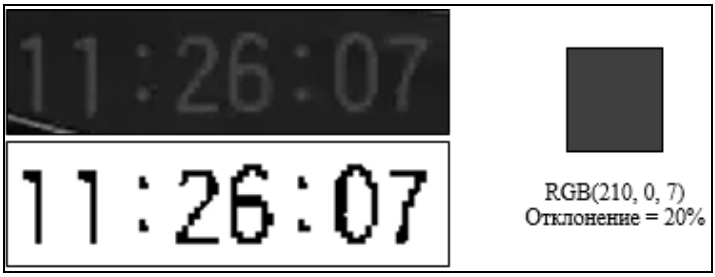


Рис. 1. Результат работы алгоритма (слева). Значение основного цвета и допустимого отклонения от него (справа)

Для того чтобы оценить? насколько изменится качество распознавания видеоизображений, осуществлено распознавание собранного набора тестовых видеофайлов с встроенной в Tesseract предобработкой – бинаризацей методом Отцу [4], а затем с предобработкой данным алгоритмом.

Функция оценивания общего процента распознавания видеоданных описана в работе [2]. Стоит отметить, что исследование осуществлялось в программном обеспечении DiViLab – цифровая видеолаборатория [5]. Это позволило более эффективно контролировать ошибку второго рода, полагаясь на графическое представление результата распознавания в виде графиков. Предобработка реализованным алгоритмом изменила общий процент распознавания видеоданных с 46,18 до 51,09%. Данный коэффициент распознаваний является относительным и получен на основе тестовой выборки, в которую собраны видеоряды, представляющие разнообразие вариаций тайм-кода. Реальная встречаемость сложных для распознавания тайм-кодов (рис. 2) ниже, чем в тестовой выборке. Кроме того, приведенные данные не учитывают результаты автоматизации коррекции результатов распознавания.

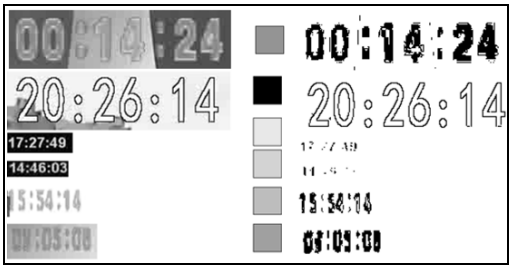


Рис. 2. Примеры сложных для распознавания изображений тайм-кода из использованной тестовой выборки

Несмотря на положительный результат относительно базовых возможностей библиотеки, сохранился целый набор ситуаций, в которых использованный алгоритм оказался бессилен. Анализ полученных результатов показал, что основной проблемой, осложняющей предобработку, является неоднородность по цвету пикселей символов тайм-кода, из-за низкого разрешения, шумов и артефактов сжатия. Также попадаются кадры, обработка которых данным алгоритмом не позволяет подавить «сложный» фон из-за его схожести с цветом текста. Это говорит о невозможности выделить тайм-код на видеоизображении, опираясь только на его цвет. Необходимо учитывать и другие отличительные параметры текста, например его форму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tesseract OCR: An optical character recognition engine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://opensource.google.com/projects/tesseract, свободный (дата обращения: 09.03.20).

2. An Overview of the Tesseract OCR Engine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://github.com/tesseract-ocr/docs/blob/master/tesseracticdar2007.pdf, свободный (дата обращения: 09.03.20).

3. Нейфельд О.А., Рудникович А.С. Возможности OCR-библиотеки Tesseract при распознавании текста по видеоизображениям // Матер. докл. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2019», Томск, 22–24 мая 2019 г. – Томск: В-Спектр, 2019. –Ч. 2. – С. 16–19.

4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.: journal. – 1979. – Vol. 9. – P. 62–66.

5. DiViLab – цифровая видеолаборатория [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://diviline.ru/products/divilab, свободный (дата обращения: 09.03.20).

УДК 621.397

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ТИПА АВТОКОДИРОВЩИК В ЗАДАЧАХ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ

А.А. Новгородов, студент; А.С. Рудникович, ст. преп.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, novgorodov.a.119-m3@e.tusur.ru

Произведен эксперимент с нейронной сетью типа автокодировщик для задачи восстановления изображений из набора MNIST. Получены зависимости значения loss-функции от эпохи обучения при устранении различных типов шума, а также зависимости PSNR от параметров шума. Подтверждена низкая эффективность оценок типа PSNR при восстановлении изображений символов с использованием нейронной сети.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронная сеть, автокодировщик, восстановление изображений, шумоподавление.

Задача восстановления изображений является одной из важнейших прикладных задач технического зрения и видеоаналитики. Использование машинного обучения является перспективным направлением в обработке изображений и, в частности, для задач шумоподавления.

В данной работе для решения задач шумоподавления рассматривается архитектура нейронной сети, называемая автокодировщик. Автокодировщик является одной из традиционных архитектур и используется для извлечения признаков, когда нужно из сложных данных

большой размерности выделить признаки, которые содержат ключевую информацию. Другими словами, решается задача понижения размерности [1].

Основная идея работы автокодировщика заключается в том, чтобы научить нейронную сеть на выходе выдавать те же данные, которые ей подали на вход. При этом промежуточный слой должен быть меньшей размерности, чем входной и выходной слои. В таком случае нейронная сеть научится создавать некое внутреннее представление входных данных, но меньшей размерности, и из них декодировать их обратно, чтобы восстановить исходные данные.

Обучение происходит путем обновления весов в графе вычислений. Для обучения сети вычисляется функция потерь, которая характеризует ошибку предсказания нейронной сети. Обучение сети происходит по методу обратного распространения ошибки. Метод обратного распространения ошибки вычисляет градиент функции потерь, который указывает направление ее роста. Для уменьшения функции потерь совершается градиентный шаг в обратном направлении с определенным коэффициентом, называемый скоростью обучения.

Идея шумоподавляющего автокодировщика состоит в том, чтобы восстанавливать входные данные не по ним самим, а по некоторому зашумленному варианту. Таким образом, нейронной сети придётся не просто сжать полученные данные, но и восстановить утраченные [2].

В работе использовался набор данных MNIST [3] с добавлением отдельных видов шумов. Пример данных из набора представлен на рис. 1. В качестве функции потерь был выбран средний квадрат ошибки, а метод оптимизации – Adam [4], который является комбинацией стохастического градиентного спуска и градиентного спуска с инерцией.

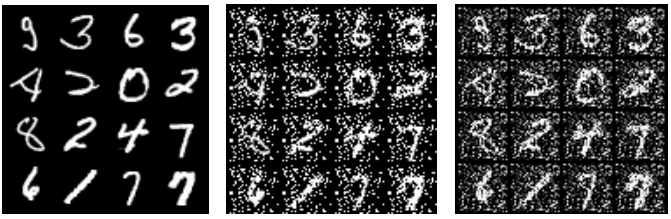


Рис. 1. Примеры изображений: без шума, импульсный шум, нормальный шум

Для проведения эксперимента была собрана нейронная сеть с четырьмя скрытыми слоями и функцией активации RELU между слоями.

При создании нейронной сети веса генерируются случайным образом. Для тренировки вычисляется выход сети, средний квадрат

ошибки (MSE) относительного чистого изображения и градиент от функции потерь. Затем выполняется градиентный шаг с помощью оптимизатора Adam. Значения функции потерь в зависимости от эпохи представлены на рис. 2 для импульсного и нормального шума соответственно.

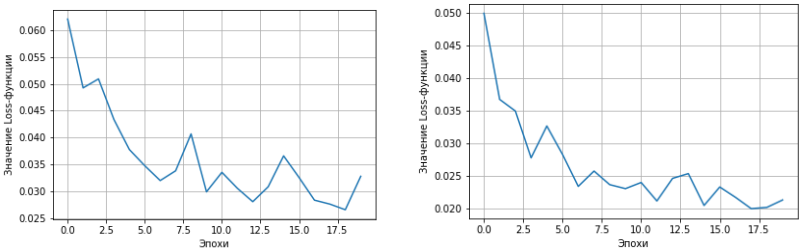


Рис. 2. Значение Loss-функции в зависимости от эпохи:
импульсный шум, нормальный шум

Для сравнения используем классические методы шумоподавления на зашумленных данных. Для импульсного шума используется медианный фильтр, а для нормального шума – фильтр Гаусса (рис. 3).

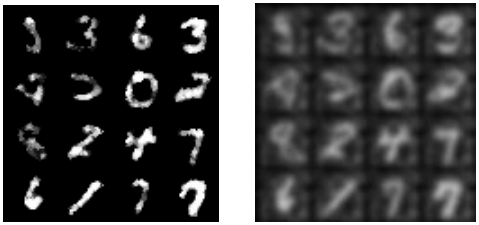


Рис. 3. Пример очищенных данных классическими алгоритмами:
медианный фильтр, фильтр Гаусса

После шумоподавления с помощью нейронной сети цифры на изображениях визуально стали более читабельны, чем цифры, восстановленные классическими алгоритмами. Изображения после шумоподавления нейронной сетью, обученной 18 эпохами, представлены на рис. 4.

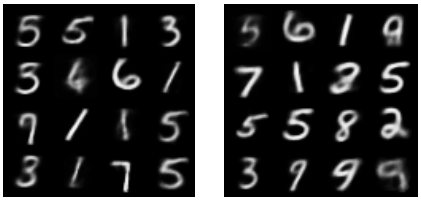


Рис. 4. Пример очищенных данных нейронной сетью:
импульсный шум, нормальный шум

В ходе эксперимента на уже обученную сеть подавались данные с разными типами шума и различной интенсивностью. Результаты измерений пикового отношения сигнал/шум (PSNR) в зависимости от параметров импульсного и нормального шумов приведены на рис. 5.

По изображениям можно видеть, что шумоподавление нейронной сетью обеспечивает достаточно хорошие результаты. Однако стоит учитывать, при высокой степени потери данных результаты применения нейронной сети отличаются от классических апертурных методов. Рисунок 6 демонстрирует искажения символов при устранении импульсного шума с интенсивностью 90%, при этом PSNR сохраняет относительно неплохие значения.

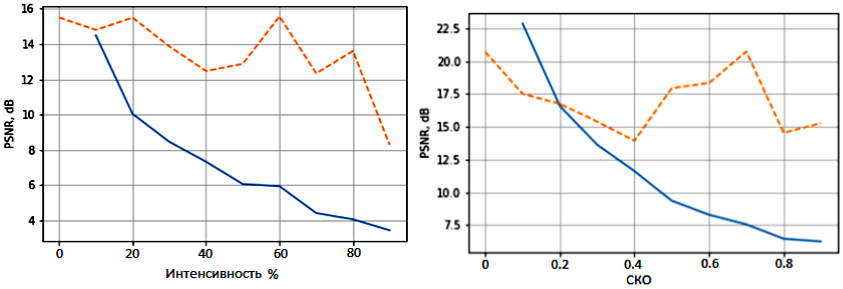


Рис. 5. PSNR в зависимости от интенсивности импульсного шума и СКО нормального шума для изображений: зашумленного (пунктир) и восстановленного (линия)

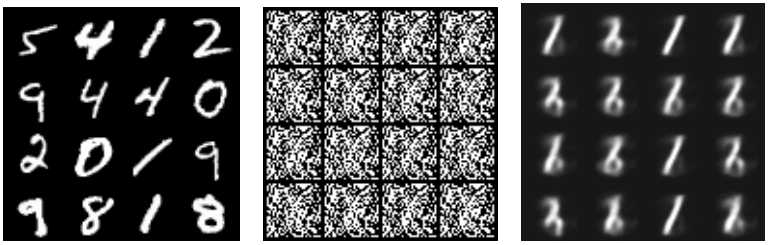


Рис. 6. Исходное, зашумленное и восстановленное изображения (импульсный шум 90%)

Заключение. Метод шумоподавления с помощью нейронной сети типа автокодировщик более эффективен, чем классические апертурные методы в задачах восстановления изображений, содержащих символьные данные. Использование в таких задачах СКО, SNR, PSNR и подобных методов объективного контроля является нелучшим выбором, особенно при высокой степени искажений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николенко С.И., Кадурин А., Архангельская Е.В. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.

2. Шакла Н. Машинное обучение и TensorFlow. – СПб.: Питер, 2019. – 336 с.

3. The MNIST Database of handwritten digits [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (дата обращения: 18.02.2020).

4. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

УДК 65.01.007

ВНЕДРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ «GO-CRM» С ПОМОЩЬЮ КОЛИЧЕСТВЕННОГО МЕТОДА СРАВНЕНИЯ

А.А. Смашная, студентка каф. ТУ

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

г. Томск, ТУСУР, asmashnaya@bk.ru

«Go-CRM» – это CRM-система, предназначенная для таких организаций, как фитнес-центры, школы иностранных языков, йога-центры, учебные центры и центры детского развития. Позволяет регулировать не только взаимоотношения с клиентами, но и работу внутри организации.

Ключевые слова: CRM-система, доступность, отчетность, «Облачное хранилище», рассылка, потребитель, экспертная оценка, анализ, конкуренты.

CRM-система, система управления взаимоотношениями с клиентами, – это прикладное программное обеспечение, предназначенное для автоматизации взаимодействий с потребителями. Внедряется на предприятии с целью повышения эффективности деятельности путем привлечения большего числа клиентов [1].

Основными задачами внедрения системы в организации являются: сбор базы данных о клиентах и потенциальных потребителях, повышение уровня качества взаимоотношений с клиентами, повышение уровня продаж, автоматизация должностных обязанностей, отчетность, статистика.

В данной статье представлены описание и анализ CRM-системы, предназначенной для детских центров, спортивных клубов и школ иностранных языков – «Go-CRM». Представляет собой систему различных функций, которые помогают достичь решения основных задач организации: воронка продаж, база клиентов, управление заказами, продуктовый каталог, телефония, бизнес-процессы, система лояльно-

сти, мониторинг работы персонала, тайм-менеджмент, управление поддержкой, отчетность, интеграция с почтой, email-рассылка, хранилище данных, счета и движение финансов, экспорт/импорт данных, API – способы взаимодействия с другими программами, веб-формы, online-оплата [2].

По запросу в сети Интернет «CRM-системы для детских центров» самыми востребованными являются: Go-CRM, «Мой класс», «Битрикс 24», Hollihop, Альфа CRM, CRM «АвтоВебОфис» [3]. В результате их анализа было произведено сравнение по существенным характеристикам функционирования методом экспертной оценки, участниками которой являлись сотрудники филиала ООО «Вилла Курица» в г. Канске Красноярского края; результаты приведены в таблице.

Коэффициент качества идеи (M_j) для выбранных CRM-систем рассчитывается по следующей формуле:

$$M_j = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \times \mu_i \to \max, \quad (1)$$

где j – конкурирующая услуга (идея); i – характеристики; n – число характеристик; α_i – приоритет параметра; μ_i – нормированное значение параметров.

Приоритет параметра вычисляется по формуле

$$\alpha_i = \beta_i / \sum_1^n \beta_i, \quad (2)$$

где β_i – вес параметра, при этом $\sum_1^n \beta_i = 1$.

Количественное сравнение CRM-систем

Параметры	μ_i					
	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5	Вар. 6
1	4,4 (0,96)	2,6 (0,57)	3,0 (0,65)	3,6 (0,78)	3,8 (0,83)	3,0 (0,65)
2	4,0 (0,91)	3,8 (0,86)	4,2 (0,95)	4,2 (0,95)	4,0 (0,91)	3,8 (0,86)
3	4,4 (1,0)	3,4 (0,77)	3,8 (0,86)	3,2 (0,73)	3,8 (0,86)	2,8 (0,64)
4	4,2 (1,0)	3,2 (0,76)	3,4 (0,81)	1,8 (0,43)	3,0 (0,71)	3,6 (0,86)
5	4,2 (0,95)	2,0 (0,45)	4,4 (1,0)	2,6 (0,59)	3,6 (0,82)	3,0 (0,68)
6	3,8 (1,0)	1,8 (0,47)	3,6 (0,95)	3,4 (0,89)	2,8 (0,74)	2,4 (0,63)
7	4,2 (0,95)	3,6 (0,82)	3,4 (0,77)	3,4 (0,77)	3,2 (0,73)	2,6 (0,59)
8	3,8 (0,95)	2,8 (0,7)	4,0 (1,0)	3,2 (0,8)	3,4 (0,85)	2,6 (0,65)
M_j	0,98	0,67	0,87	0,74	0,81	0,7

Первый показатель в ячейке – коэффициент качества идеи – рассчитывался путем вывода среднего значения из экспертных оценок сотрудников. Второй показатель – приоритет параметра – находится путем отношения веса данного параметра к весу суммы всех параметров.

В результате количественного метода сравнения CRM-систем для внедрения на предприятии наибольшие показатели коэффициента качества идеи и приоритета параметра выявлены у системы «Go-CRM», которая, по мнению сотрудников, является более простой в управлении и использовании в работе. Данная система будет внедрена в одном из филиалов франшизы ООО «Вилла Курица» в г. Канске Красноярского края [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. CRM-система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://best crm.ru/crm-system-chto-eto-kak-rabotaet/ (дата обращения: 29.12.2019).

2. GoCRM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://go-crm.ru/ (дата обращения: 9.01.2020).

3. CRM для детских центров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://crmindex.ru/for/detskie_centru/ (дата обращения: 10.01.2020).

4. Смашная А.А. Подготовка к внедрению информационной системы управления взаимоотношениями с клиентами на предприятии сервиса ООО «Вилла Курица». – Томск, 2019. – 33 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.5

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

*Председатель – **Рогожников Е.В.**, доцент каф. ТОР, к.т.н.;*
*зам. председателя – **Демидов А.Я.**, проф. каф. ТОР, к.ф.-м.н.*

УДК 621.376

РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕННЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ QPSK-МОДЕМА

В.Е. Баранина, студентка каф. РТС
Научный руководитель В.А. Кологривов, доцент каф. РТС
г. Томск, ТУСУР, candyvit98@gmail.com

Приведен анализ полученных результатов исследования мультиплексирования разноскоростных сигнальных потоков в радиоканалах на основе QPSK-модема. В качестве основной характеристики рассматривается помехоустойчивость.

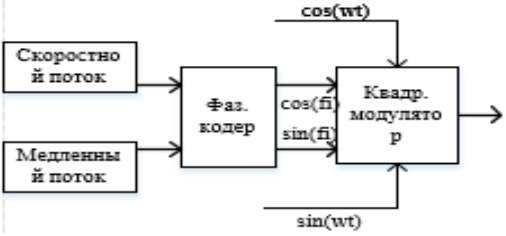
Ключевые слова: квадратурная модуляция, отношение сигнал/шум, полоса пропускания, помехоустойчивость, радиоканал, сигнальный поток.

В связи с насыщением радиодиапазона и увеличением объема передаваемой информации существует проблема повышения пропускной способности канала передачи. При этом возникает необходимость мультиплексирования сигнальных потоков, в том числе и разноскоростных [1]. Однако по-прежнему одной из важных характеристик системы связи остается помехоустойчивость, определяемая отношением сигнал/шум. Удельный расход полосы пропускания, требуемый для передачи одного бита информации с заданной вероятностью ошибки, называется спектральной эффективностью [2].

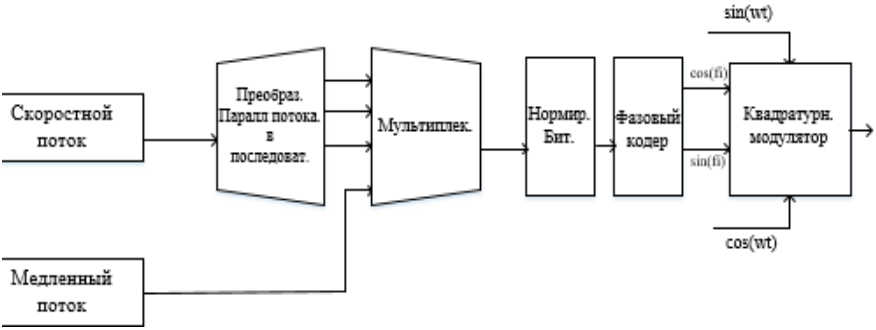
В работе приводятся результаты модельного исследования помехоустойчивости, полос пропускания и спектральных эффективностей QPSK-модема с двумя мультиплексируемыми разноскоростными потоками данных при изменении отношения скоростей потоков. Для упрощения принято, что разноскоростные потоки кратны [1].

Предлагаемые решения. Процесс мультиплексирования представляет собой процедуру уплотнения потоков данных для передачи

их по общей линии связи с целью повышения пропускной способности информационного канала. Предлагается исследовать возможность мультиплексирования потоков данных, используя структуру квадратурного модулятора на этапе фазового кодирования. Здесь возможны два варианта объединения разноскоростных потоков данных модема – с полосой, определяемой медленным сигнальным потоком (рис. 1, *а*), и полосой, определяемой быстрым сигнальным потоком (рис. 1, *б*).



а



б

Рис. 1. Варианты реализации мультиплексирования каналов передачи модема

Условия модельного эксперимента. Моделирование производилось в относительных масштабах времени и частоты. Модельному исследованию подверглись функциональные решения как первого, так и второго вариантов при отношениях скоростей потоков данных 1:1, 2:1, 3:1. В работе исследуется модем с одной несущей и фазовым разделением каналов.

Результаты исследования. Приведем результаты модельного исследования QPSK-модема (таблица) с целью достижения компромиссных параметров между скоростью передачи и помехоустойчивостью при вероятности битовой ошибки $P_в = 10^{-3}$.

Так, варианты мультиплексирования каналов передачи данных с одинаковыми скоростями имеют SNR, помехоустойчивость и спектральные эффективности, совпадающие со стандартным QPSK-модемом.

При увеличении скорости одного из информационных потоков в первом варианте моделирования быстрый поток разделяется на параллельные подпотоки и мультиплексируется на входе фазового кодера с низкоскоростным потоком, образуя управляющий символ, что соответствует модуляции M-PSK.

Результаты модельного исследования

Скорость передачи	Тип модуляции	Первый вариант (ориентация на медленный поток)	Тип модуляции	Второй вариант (ориентация на быстрый поток)
		SNR, дБ		SNR, дБ
1/1	QPSK	8,1/8,45	QPSK	8,1/8,45
2/1	8-PSK	14,4/13,42	QPSK	8,91/7,78
3/1	16-PSK	19,39/19	QPSK	9,1/8,5
QPSK class	Скорость передачи канала		SNR, дБ	
	0,5		8,45	

Требуемый SNR обоих каналов для обеспечения заданной вероятности ошибки в этом случае возрастает. Необходимая полоса пропускания и спектральная эффективность определяются медленным потоком. Следовательно, подтверждается, что система с мультиплексированием (отношение скоростей потоков 2:1, 3:1) имеет помехоустойчивость, определяемую используемой модуляцией (в данном случае QPSK, 8-PSK, 16-PSK).

В случае же со вторым вариантом моделирования увеличение относительной скорости потоков при вероятности ошибки $P_в = 10^{-3}$ измеренные значения SNR изменяются в небольших пределах. При этом требуемая полоса пропускания и спектральная эффективность определяются быстрым потоком, а помехоустойчивость будет определяться лишь QPSK-модуляцией.

Заключение. Исследованы два варианта реализации разноскоростных потоков данных. В первом варианте скорость медленного потока и тип используемой модуляции определяют помехоустойчивость и спектральную эффективность рассматриваемой системы связи. Во втором варианте реализации быстрый поток определяет требуемую полосу пропускания и спектральную эффективность, а помехоустойчивость соответствует QPSK-модуляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кологривов В.А. Энергетическая и спектральная эффективности способов мультиплексирования разноскоростных сигнальных потоков в радиоканале // Тридцатая междунар. практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2017. – Ч. 1. – С. 22–26.

2. Песков С.Н. Основы цифровых технологий. – Ч. 2: Методы модуляции. Помехоустойчивость / С.Н. Песков, А.И. Барг, М.В. Балков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: //www.konturm.ru/download/stat/2005/290805.pdf, свободный (дата обращения: 16.02.20).

УДК 654.164

СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО БЕСПРОВОДНОМУ КАНАЛУ С ПОМОЩЬЮ NRF24L01

А.Б. Гомбоин, студент

Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ТОР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, a.gomboin@mail.ru

Продемонстрирована работа передачи данных по беспроводному каналу связи. Система разработана из различных устройств и состоит из 3 блоков.

Ключевые слова: система передачи данных, беспроводная связь, Интернет вещей, модуль NRF24L01, Arduino IDE, AK-304-A-BBW, TFT ILI9341.

В наше время Интернет вещей имеет большую актуальность, так как нас окружают беспроводные устройства. Чтобы наглядно и достаточно просто разобраться в их работе, была разработана эта система передачи данных по беспроводному каналу.

Модуль, применяемый системе, имеет диапазон частот 2,4 ГГц и широко применяется в беспроводных устройствах и использует интерфейс обмена данными – SPI. Поэтому была выбрана плата NRF24L01, технические характеристики которой представлены в табл. 1 [1, 2].

Таблица 1

Технические характеристики модуля

Напряжение питания	1,9–3,6 В
Интерфейс обмена данными	SPI
Частота приёма и передачи	2,4 ГГц
Количество каналов	128 с шагом 1 МГц
Тип модуляции	GFSK
Скорость передачи данных	250 kbps, 1 и 2 Mbps
Чувствительность приёмника	–82 дБм
Расстояние приёма/передачи данных	100 м – прямая видимость; 30 м – помещение
Коэффициент усиления антенны	2 дБм
Организация сети на одном канале	7 модулей (1 приёмник и 6 передатчиков)

Модуль для отображения введенной и полученной информации – монитор TFT ILI9341. Функционал позволяет вывести необходимые данные и показать их пользователю. Также этот монитор использует интерфейс обмена данными SPI, что ускоряет обмен информации с микроконтроллером. Технические характеристики этого модуля представлены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Технические характеристики модуля TFT ILI9341

Размеры модуля	52×78×12 мм
Диагональ	2,8 или 3,2 дюйма
Разрешение	240x320 пикселей
Цветность	65 тыс. цветов в формате RGB 5-6-5
Напряжение питания	3,3–5 В
Протокол обмена данными	SPI

Разработанная структурная схема макета состоит из 3 блоков, которые состоят из микроконтроллера, клавиатуры, монитора и беспроводного модуля. В первом блоке вводятся данные и отправляются на второй. Во втором блоке полученные данные искажаются или дополняются и отправляются на последний блок. Основным вычислительным устройством является микроконтроллер ATmega328. Выбран он, потому что отличительной чертой данных плат являются общедоступность, низкая стоимость, простота проектирования, скорость разработки [4].

В данной системе, структурная схема которой представлена на рис. 1, реализуется передача данных с помощью приемопередающего модуля NRF24L01. Данные вводятся с клавиатуры AK-304-A-BBW, после чего обрабатываются и передаются в память микроконтроллера. Для отображения информации используется монитор TFT ILI9341, который выводит обработанные микроконтроллером нажатые кнопки, так пользователь сможет отслеживать, что происходит в системе. Было реализовано удаление введённых данных, как в памяти микроконтроллера, так и графическое представление на мониторе. Также на мониторе было запрограммировано меню для простоты использования. После того как пользователь ввел данные, ему предлагается передать их на другой модуль. Передача на второй модуль осуществляется делением сообщения на два пакета для быстроты передачи данных. Эти два пакета кодируются и отправляются на второй модуль, где происходит декодирование принятых пакетов. После принятые пакеты склеиваются, данные отправляются на TFT ILI9341 (монитор) и пользователь может увидеть то, что он получил от другого модуля,

и внести изменения в полученные данные и отправить на следующий модуль.

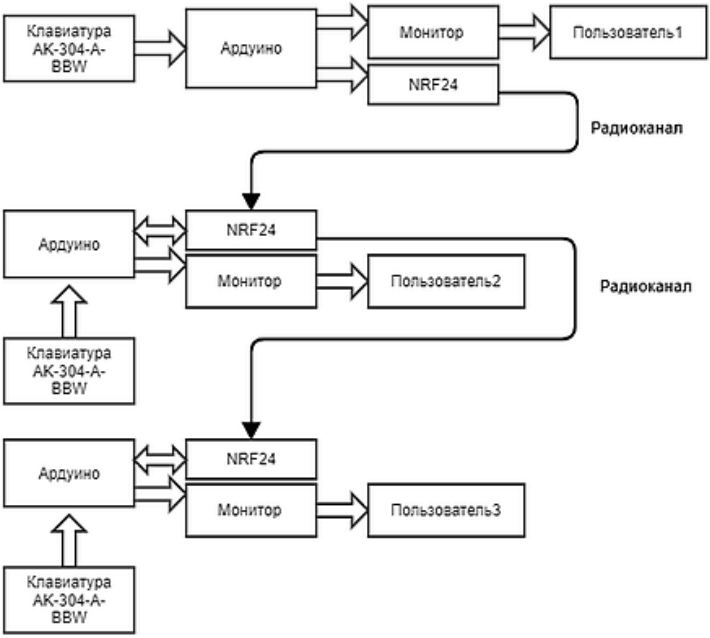


Рис. 1. Структура системы

Система может использоваться в Интернете вещей, а также для привлечения абитуриентов и в учебных целях по направлению «Беспроводная связь». Может разнообразить изучение данного направления. Эта система поможет вызвать больший интерес у студентов в изучении беспроводных сетей, телекоммуникаций, Интернета вещей и систем беспроводной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu Z., Zhao G. Short-range wireless data transmission based on nRF24L01 // Applied Science and Technology. – 2008. – Vol. 3.

2. Технический обзор микросхемы приемопередатчика NRF24L01+ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru (дата обращения: 01.02.2019).

3. Mintzer Z. Microcontroller Application for Linear and Rotational Motion Sensing. – 2015. – 35 c.

4. Das K., Ghosh H., Sengupta M. Single axis solar tracking system using microcontroller (atmega328) and servo motor / /International Journal of Scientific and Research Publications. – 2016. – Vol.. 6, № 6. – 486 p.

УДК 621.396.61, 621.376.3

ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ MSK-МОДУЛЯЦИИ

А.А. Игумнова, Н.А. Игумнова, студентки каф. РТС
Научный руководитель В.А. Кологривов, доцент каф. РТС
г. Томск, ТУСУР, nadegda-1998-igumnova@mail.ru

Приведены способы формирования и приема MSK-сигналов. В качестве характеристики для сравнения работы схем выбрана помехоустойчивость. По результатам исследования выбраны оптимальные варианты формирования и передачи сигналов.
Ключевые слова: MSK-модуляция, фазовый метод, синхронный детектор, корреляционный прием, помехоустойчивость.

Постановка задачи. Частотная манипуляция – вид манипуляции, при которой скачкообразно изменяется частота несущего колебания в зависимости от значений символов информационной последовательности. У исследуемого вида MSK-модуляции минимальный разнос частот и фаза непрерывна, т.е. не имеет скачков. Данному виду манипуляции соответствует разнос частот, равный $\Delta f = 1/2 \cdot T$, где T – длительность бита, что соответствует условию ортогональности несущих [1].

Функциональные модели (рис. 1–4) содержат: источник информационного потока данных (Source), модулятор, модель канала распространения, фильтры, демодулятор, подсистему принятия решений (Decide), опирающуюся на значение порога (C), регистрирующие приборы в виде двухканального осциллографа (Scope) и детектора ошибок (Err), подключенного к дисплею (Display). На вторые входы осциллографа и детектора ошибок от источника данных организуется «прямой канал» с необходимой задержкой (τ).

Ниже представлена модель модема (рис. 1) с модулятором на основе генератора, управляемого напряжением (ГУН(VCO)), а приём осуществляется методом синхронного детектирования (СД).

В модеме (рис. 2) прием осуществляется с помощью корреляционной обработки сигнала.

В модемах (рис. 3, 4) MSK-модуляция осуществляется фазовым методом (ФМ), а демодуляция, соответственно, синхронным детектированием и корреляционной обработкой.

Методика измерения отношения сигнал/шум. Для схем, где реализовано синхронное детектирование, соотношение сигнал/шум (SNR) измеряется в точке A отключением генератора шумов канала распространения. Изменение отношения сигнал/шум достигается вариацией параметра дисперсии генератора псевдослучайной гауссовской последовательности модели канала распространения.

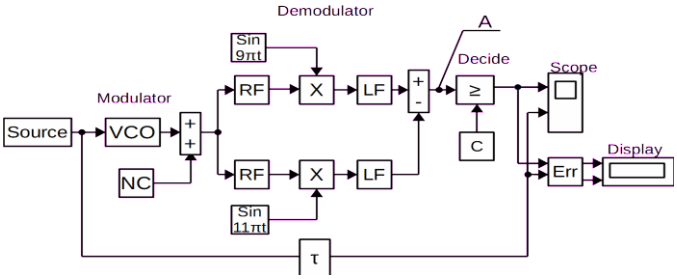


Рис. 1. Схема модема с ГУН и СД

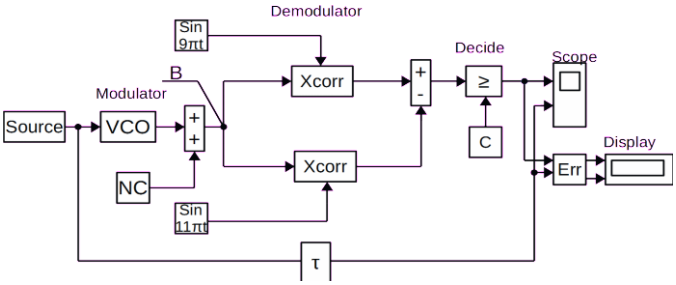


Рис. 2. Схема модема с ГУН и коррелятором

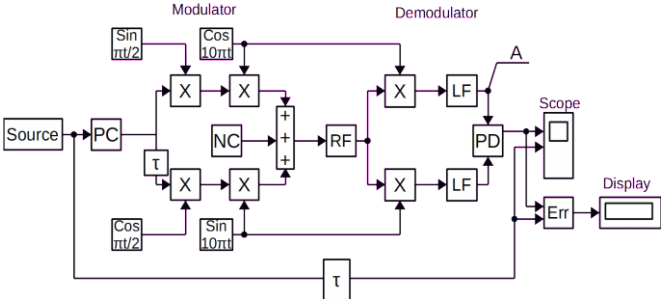


Рис. 3. Схема модема с ФМ и СД

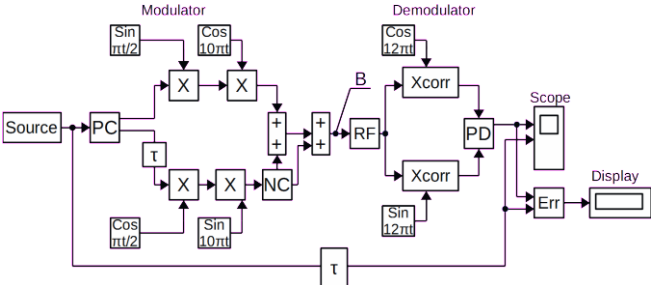


Рис. 4. Схема модема с ФМ и коррелятором

Для схем, ведущих приём с помощью коррелятора, методика измерения помехоустойчивости другая: сначала измеряется мощность шума (N) на входе приемника (точка B) при отключенном сигнале, затем измеряется мощность смеси полезного сигнала с шумом (SN). По полученным данным определяется соотношение сигнал/шум по следующей формуле:

$$SNR = (SN - N) / N.$$

Результаты модельных исследований. Исследования проводились в относительном масштабе частоты и времени. Полоса пропускания фильтров определяется соотношением $2 \cdot \pi / T_s$, где T_s – длительность символа. Полученные значения SNR соответствуют вероятности битовой ошибки, равной 10^{-3}. Результаты исследований сведены в таблицу.

Значения *SNR* для различных типов схем

Тип схемы	Отношение сигнал/шум, дБ
Схема с ГУН и СД	6,90
Схема с ГУН и коррелятором	5,55
Схема с ФМ и СД	11,33
Схема с ФМ и коррелятором	11,25

При использовании ГУН с синхронным детектором без сложения сигналов на выходе SNR составило 12,04 дБ. При сложении каналов на выходе схемы SNR улучшается примерно на 6 дБ. Это можно объяснить следующим образом: полезный сигнал на несущих существует в разное время, т.е. мощность не суммируется при сложении плеч. Шум канала разветвляется в оба плеча схемы, и при сложении плеч его мощность возрастает в 4 раза (6 дБ), т.к. шумы в данном случае коррелированы. В таблице результаты для схем с ГУН приведены при сложении каналов обработки. В схемах на основе ФМ сложение каналов обработки невозможно. Применение корреляционной обработки в схемах существенно не меняет SNR.

При применении фазового метода модуляции полученное значение SNR соизмеримо с SNR для схемы с ГУН и СД без сложения каналов обработки.

Выводы. Модельное исследование показало предпочтительность по помехоустойчивости схем на основе ГУН из-за возможности объединения каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С. 113–127.

УДК 621.37

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СВЧ-ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С РАБОЧИМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТ ДО 6 ГГц

Е.М. Савченко, зам. зав. каф., доцент каф. РТУ МИРЭА, к.т.н.;
А.Д. Першин, нач. отд. ООО «МАС»;
А.А. Любшов, аспирант НИЯУ МИФИ
г. Москва, designcenter@icvao.ru

Приводятся результаты исследований интермодуляционных искажений третьего порядка, СВЧ-широкополосных усилителей (ШПУ), серийно выпускаемых в АО «НПП «Пульсар».
Ключевые слова: интермодуляционные искажения третьего порядка, OIP3, СВЧ-широкополосные усилители (ШПУ).

В современных системах связи одним из ключевых параметров, влияющих на качество сигнала и способность приемника принимать полученный модулированный сигнал, является интермодуляционная избирательность. Одним из распространенных блоков любого приемного устройства является СВЧ ШПУ, позволяющий усилить мощность сигнала до необходимого уровня. Важным при этом является внесение в сигнал наименьших искажений.

Интермодуляционные искажения в широкополосных усилителях – это дополнительные составляющие в спектре выходного сигнала, возникающие в нелинейных элементах усилителей (транзисторах), при взаимодействии нескольких сигналов с разными частотами. Наихудшими являются продукты интермодуляционных искажений третьего порядка (OIP3), так как располагаются ближе всего к несущим частотам ($2f_2 - f_1$ и $2f_1 - f_2$), и их тяжелее всего отфильтровать. Большой уровень OIP3 ШПУ, используемых в приемниках систем связи, могут существенно ухудшать их интермодуляционную избирательность.

Одним из широко востребованных и распространенных отечественных СВЧ ШПУ являются интегральные микросхемы серии 1324 [1]. Схемы представляют собой усилитель на основе составного транзистора Дарлингтона с параллельной отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению. Использование ООС позволяет обеспечить широкую полосу пропускания при небольшой площади кристалла ИМС. Верхняя граничная частота полосы пропускания в СВЧ-диапазоне определяется частотными свойствами элементного базиса использованного технологического процесса [2, 3].

Были проведены исследования OIP3 СВЧ ШПУ серии 1324, выполненных на основе Si и GaAs технологических процессах с диапазоном рабочих частот до 3 и до 6 ГГц соответственно. В таблице приведены основные характеристики исследуемых ШПУ. На рис. 1 представлены результаты измерения OIP3 и $P_{вых}$ 1 дБ.

Основные параметры исследуемых СВЧ ШПУ

Параметр	1324УВ3У	1324УВ6У1	1324УВ2У	1324УВ15У	1324УВ8У	1324УВ9У
Тех. процесс	Si бип. тр. (0,6 мкм; f_t = 15 ГГц)			GaAs ГБТ (2,0 мкм; f_t = 31 ГГц)		
Δf, ГГц	до 3,5	до 3	до 3,1	до 6	до 6	до 6
$K_у$, дБ	19,0	19,2	20,0	19,3	20,0	22,0
$P_{вых}$, мВт	10	50	100	8	50	100
$U_п$ @ $I_п$	3,3 В @ 30 мА	5 В @ 50 мА	5 В @ 90 мА	3,3 В @ 30 мА	5 В @ 50 мА	5 В @ 100 мА

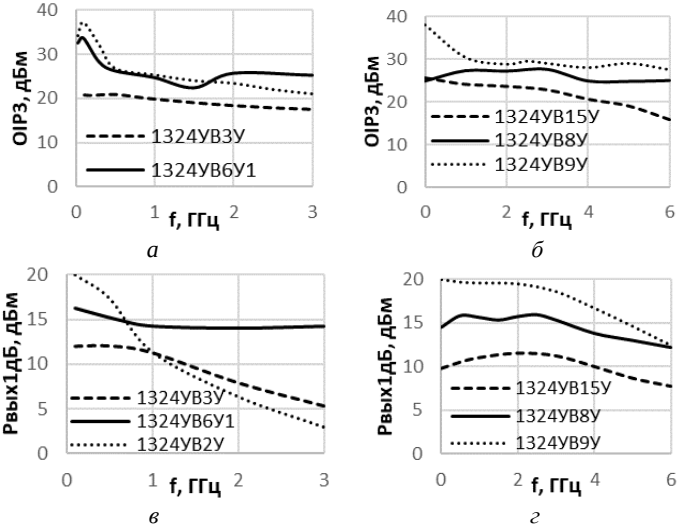


Рис. 1. Частотная зависимость OIP3 и $P_{вых}$ 1 дБ для усилителей с верхней частотой до 3 ГГц на основе Si (*а*, *в*) и до 6 ГГц на GaAs (*б*, *г*)

Измерения OIP3 проводились с использованием автоматизированного стенда, включающего в свой состав два СВЧ-генератора (Keysight, N5183B и E4438C), резистивный сумматор мощности (Mini-Circuits, ZN2PD2-14W-S+), анализатор спектра (Микран, СК4М-18) и ПО (Python, MS Exel) для управления и обработки результатов. Для каждой точки частотного диапазона строилась зависимость продуктов интермодуляции 3-го порядка (IM3) и $P_{вых}$ от уровня входной мощно-

сти и определялась точка пересечения их экстраполированных характеристик.

Основные выводы по результатам исследования:

1. Для маломощных СВЧ ШПУ 1324УВ3 и 1324УВ15У с выходной мощностью 10–12 мВт наблюдается лучшее значение OIP3 (на 4–5 дБ до 3 ГГц) для ШПУ на основе GaAs (1324УВ15У).

2. Для СВЧ ШПУ средней мощности 1324УВ6У1 и 1324УВ8У с выходной мощностью 30–50 мВт на нижних частотах кремниевый образец усилителя имеет большее значение OIP3 (на 4–6 дБ до 400 МГц). На частотах свыше 400 МГц значения OIP3 сопоставимы у обеих схем и составляют 24–28 дБм.

3. Для СВЧ ШПУ 1324УВ2У и 1324УВ9У с выходной мощностью 80–100 мВт на нижних частотах (до 400 МГц) наблюдается высокое значение OIP3 (30–37 дБм) для обоих образцов усилителей, однако с ростом частоты у кремниевого образца усилителя наблюдается существенный спад OIP3 и на верхней границе диапазона (3 ГГц) значение OIP3 падает до 20 дБм. Для ШПУ 1324УВ9У на основе GaAs значение OIP3 во всём рабочем диапазоне частот (до 6 ГГц) более равномерно и составляет не менее 28 дБ.

4. Для всех вариантов ШПУ наблюдается прямая зависимость уровня OIP3 от уровня выходной мощности, однако в некоторых поддиапазонах частот есть расхождения. В частности, для ШПУ 1324УВ6У1 частотная зависимость OIP3 не монотонна и на частотах 1–1,8 ГГц есть спад (на 4 дБ) в отличие от $P_{\text{вых}}$ 1 дБ. Для ШПУ 1324УВ9У в диапазоне 2–6 ГГц $P_{\text{вых}}$ 1 дБ падает на 6 дБ, в то время как OIP3 практически не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савченко Е.М., Будяков А.С., Першин А.Д., Дроздов Д.Г., Кузьмин А.Ю. Новые разработки отечественных СВЧ МИС широкополосных усилителей // Твердотельная электроника. СФ блоки РЭА: матер. XIV науч.-техн. конф. – М.: ОАО «НПП «Пульсар», 2015. – С. 183–187.

2. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С., Фондеркин К.И. Результаты разработки СВЧ МИС усилителей малой и средней мощности // Твердотельная электроника. СФ блоки РЭА: матер. XII науч.-техн. конф. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2013. – С. 78–81.

3. Савченко Е.М., Першин А.Д., Будяков А.С., Щепанов А.Н. Результаты разработки модулей СВЧ-усилителей мощности с диапазоном рабочих частот от 0,2 до 3,4 ГГц и выходной мощностью 5 Вт в непрерывном режиме // Твердотельная электроника. СФ-блоки РЭА: матер. XV Всерос. науч.-техн. конф. 2017. – С. 27–33.

УДК 621.396.946

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ПОДАВЛЕНИЕ ЛОЖНОГО СИГНАЛА GPS

Е.В. Николаенко, студент; Я.В. Крюков, ассистент
г. Томск, ТУСУР, каф. ТОР, theedge9723@gmail.com

Представлена модель спутниковой системы GPS. Данная модель позволяет рассчитать координату абонента на плоскости с помощью разностно-дальномерного метода. Модель реализована с помощью пакета инженерных программ MATLAB. Также представлены алгоритмы детектирования ложного GPS-сигнала.
Ключевые слова: спутники, GPS, спутниковые системы, детектирование сигнала.

В настоящее время широко применяются спутниковые системы навигации, а именно, американская спутниковые системы навигации GPS. Главной проблемой устройств, обладающих функцией определения своего местоположения с помощью GPS, остается уязвимость к поддельным GPS-сигналам. А алгоритмы для детектирования ложных сигналов не используются в гражданских системах навигации.

Таким образом, становится актуальным вопрос разработки алгоритма выявления и подавления ложного сигнала.

Целью работы является построение модели спутниковой навигации GPS, а также исследование алгоритмов выявления и подавления ложных сигналов GPS.

Для обнаружения ложного сигнала можно использовать следующие методы:

- Выделение ложного сигнала на основе определения направления на его источник. Определить направления можно, сравнивая фазы сигнала на различных антеннах.
- По мощности сигнала. Приёмники используют тот или иной коррелятор, позволяющий получить достаточное соотношение сигнал/шум. GPS-приёмник должен захватить сигнал и в дальнейшем работать с захваченными параметрами, сопровождая их. Спутник потеряет сопровождаемый код и будет вынужден захватить сигнал заново.

В первую очередь была реализована модель спутниковой системы (рис. 1, 2).

На рис. 2 представлена модель для определения движущегося источника.

В данной модели используется определение координаты с помощью трех навигационных спутников. Приемное устройство определяет свое местоположение (координату на плоскости) с помощью вычисления задержки навигационных сигналов спутников.

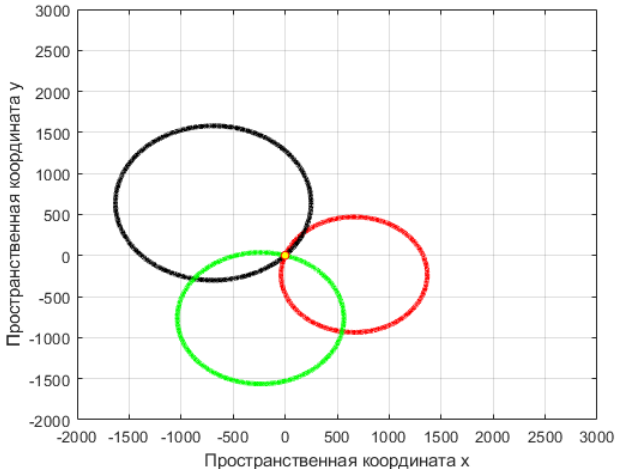


Рис. 1. Модель определения координат стационарного источника разностно-дальномерным методом

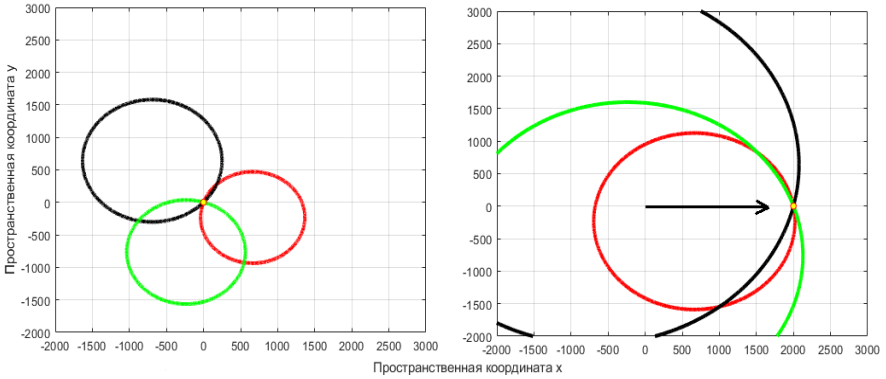


Рис. 2. Модель определения координат движущегося источника разностно-дальномерным методом

При движении координаты абонента изменяются, следовательно, изменяется расстояние от абонента до спутников, но с помощью разностно-дальномерного метода можно отследить местоположение абонента на плоскости в данный момент времени.

Задержка сигнала вычисляется с помощью корреляционной обработки.

Корреляционная функция сигналов представлена на рис. 3.

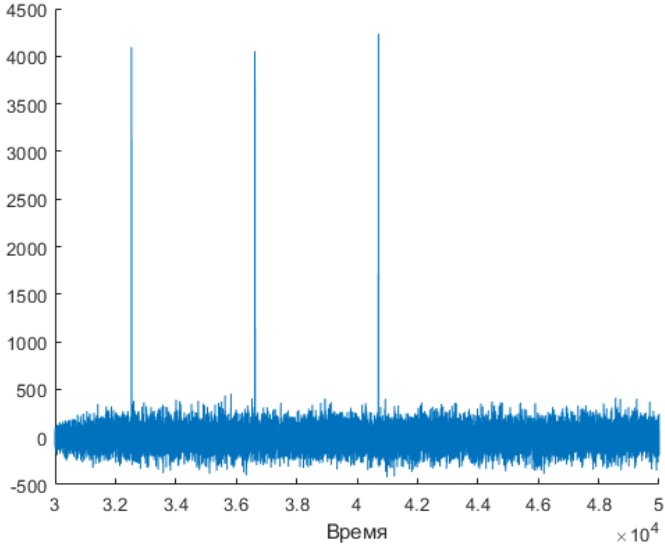


Рис. 3. Корреляционная функция сигналов

Корреляционная функция позволяет определить задержку сигналов, что позволяет точно определить координаты источника.

Таким образом, в работе представлена модель спутниковой системы GPS для определения координат абонента при помощи разностно-дальномерного метода. Данная модель описывает работу спутниковой навигации, показывает, каким образом происходит вычисление координат движущегося источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 268 с.

2. Потемкин В.Г. Справочник по MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https//www. http://matlab.exponenta.ru/ml/book2/index.php/ (дата обращения: 20.12.2018).

3. Венедюхин А. Подделка сигналов GPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www. https://dxdt.ru/2016/10/24/8151/ (дата обращения: 19.12.2018).

4. Венедюхин А. GPS-спуфинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dxdt.ru/2018/02/12/8459/ (дата обращения: 20.12.2018).

УДК 621.376.6

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА «КОДИРОВАНИЕ И МОДУЛЯЦИЯ»

А.Д. Конопля, А.В. Романов, студенты каф. ТОР
Научный руководитель Д.Ю. Пелявин, ст. преп. каф. ТОР
г. Томск, ТУСУР, каф ТОР, dmitrii.i.peliavin@tusur.ru
Проект ГПО ТОР-1901 «Кодирование и модуляция»

Рассмотрены процесс разработки лабораторного макета для учебных дисциплин и разработка универсального модулятора.
Ключевые слова: модуляция, манипуляция, мультиплексор, макет.

Одним из неотъемлемых элементов освоения ряда учебных дисциплин являются в лабораторные работы, для выполнения которых необходимо соответствующее оборудование: лабораторный стенд или установка. Однако разработка лабораторных установок или макетов является довольно трудоемким процессом, из-за чего стоимость подобных установок довольно высока – более 250 тыс. руб. В связи с такой ценой университетам экономически целесообразнее разрабатывать подобные макеты самостоятельно в рамках студенческих конструкторских бюро или группового проектного обучения студентов (ГПО).

На рис. 1 представлена функциональная схема лабораторного макета «Кодирование и модуляция», разрабатываемого в рамках проекта ГПО «ТОР-1901» и предназначенного для ряда «связных» дисциплин, изучаемых в ТУСУРе.

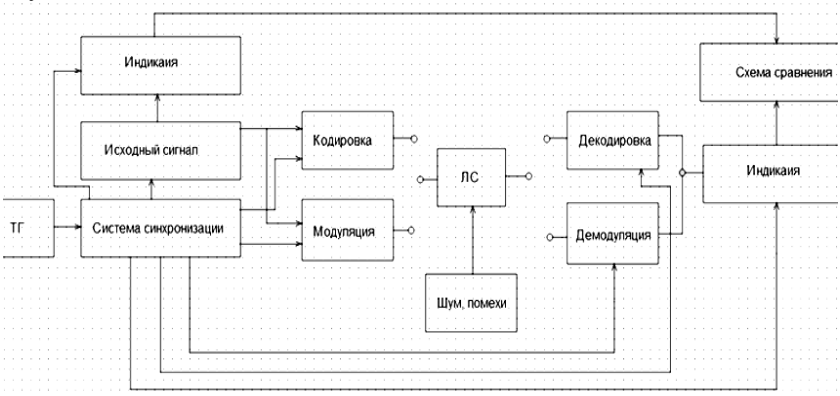


Рис. 1. функциональная схема макета «Кодирование и модуляция»

Данный макет должен будет выполнять следующие функции: генерирование восьмиразрядного цифрового кода, задаваемого пользо-

вателем (блок «исходный сигнал»); последующая модуляция или кодирование этого кода (блоки «кодирование» и «модуляция»); передача сигнала в линию связи («ЛС») с возможностью добавления шумов и/или помех («шум, помехи»); последующая демодуляция и декодирование («декодировка» и «демодуляция»); индикация. В данной статье будет разобран процесс разработки универсального модулятора.

По техническому заданию необходимо реализовать следующие виды модуляции: амплитудная (АМ), фазовая (ФМ или BPSK), частотная (ЧМ), квадратурная (QAM-4).

Стоит заметить, что изначальный сигнал является цифровым, тогда под модуляцией подразумевается манипуляция. То есть цифровой сигнал позволяет не модулировать напрямую, а манипулировать – переключать виды несущей частоты.

Реализация АМ, ФМ и ЧМ схожа. Принцип работы АМ, ФМ и ЧМ показан на рис. 2.

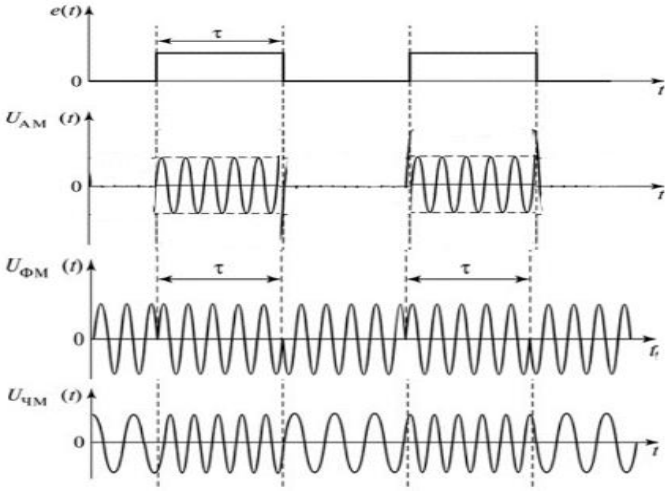


Рис. 2. Временные диаграммы исходного цифрового сигнала, амплитудной, фазовой и частотной модуляции цифрового сигнала

Суть квадратурной модуляции в следующем: изначальный цифровой сигнал разделяется на дебиты в зависимости от кодовой комбинации дебита, сигнал принимает одно из четырех возможных значений в соответствии со «звездой». На практике необходимо разделить изначальный сигнал на *I*- и *Q*-составляющие.

«Звезда» и принцип разделения сигнала на *I*- и *Q*-составляющие изображены на рис. 3.

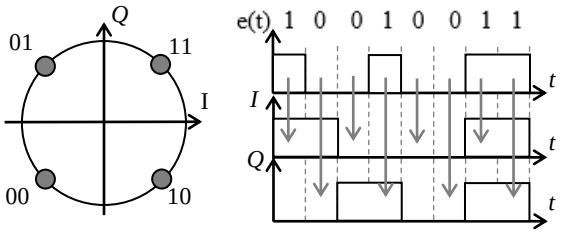


Рис. 3. «Звезда» квадратурной модуляции QAM-4
и принцип разделения сигнала на *I*- и *Q*-составляющие

Реализация всех видов модуляции отдельными переключателями сигналов хоть и является простым решением и возможна для АМ, ФМ и ЧМ, но для работы QAM-4 необходимо постоянно переключать четыре переключателя попеременно, что на практике нерационально и неэкономично. Поэтому было принято решение спроектировать универсальный модулятор на базе одного мультиплексора, к которому также будут подключены остальные типы манипулированных сигналов.

Функциональная схема универсального модулятора представлена на рис. 4.

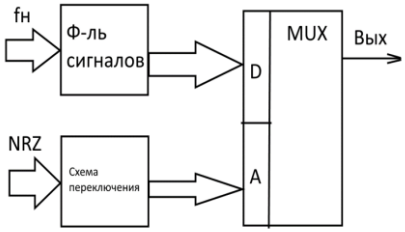


Рис. 4. Функциональная схема универсального модулятора

Как видно из функциональной схемы, необходимо разработать 2 подсхемы: формирователь сигналов и схему переключения. На данный момент в рамках ГПО была спроектирована только структурная схема переключателя, представленная на рис. 5.

Данная схема переключения является довольно сложной и потенциально в ходе дальнейшей разработки в рамках ГПО будет улучшена и изменена. При использовании схемы достаточно использовать только один переключатель для выбора вида модуляции, и она уже содержит схему разделения цифрового сигнала на *I*- и *Q*-составляющие.

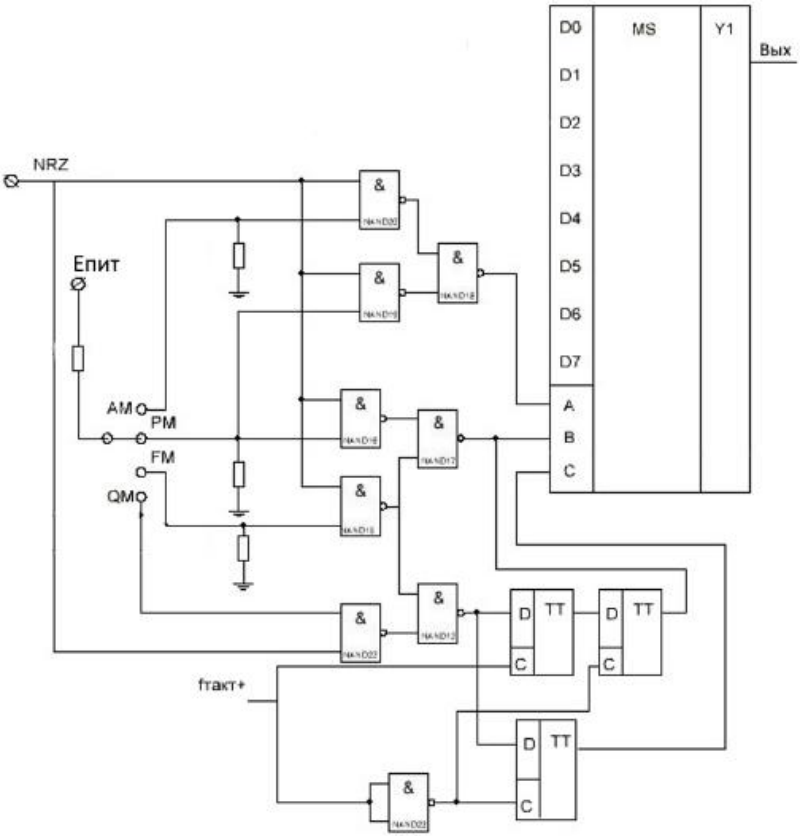


Рис. 5. Структурная схема переключателя

Следующим шагом в разработке универсального модулятора является разработка формирователя сигналов, над чем в настоящее время и идет работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шахгильдянов В.В. Радиопередающие устройства. – М.: Радио и связь, 2003. – 553 с.

2. Пуговкин А.В. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/6061 (дата обращения: 01.02.2020).

3. Квадратурная и фазовая манипуляция (QPSK) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ru.dsplib.org/content/signal_qpsk/ signal_qpsk.html (дата обращения: 01.02.2020).

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

*Председатель – **Коцубинский В.П.**, доцент каф. КСУП, к.т.н.;*
*зам. председателя – **Винник А.Е.**, н.с. каф. КСУП*

УДК 004.021

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ К ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА

К.В. Гончаров, студент каф. АСУ;
А.Н. Горитов, проф. каф. АСУ, д.т.н.
Научный руководитель А.Н. Горитов, проф. каф. АСУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, roadto3kmmr@gmail.com

Предложен алгоритм планирования траектории перемещения многозвенного манипулятора, основанный на алгоритме муравьиных колоний. Реализован программный продукт, позволяющий провести построение траектории перемещения манипулятора с применением предложенного алгоритма.
Ключевые слова: многозвенный манипулятор, планирование перемещения, алгоритм муравьиных колоний, Python.

Задача планирования перемещения имеет большое значение. Оптимальная траектория позволяет минимизировать время и работу, затрачиваемые на перемещение рабочего органа робота в заданную точку. Задача осложняется наличием во внешней среде препятствий, столкновение с которыми звеньев манипулятора недопустимо. В данной работе предлагается алгоритм планирования траектории перемещения многозвенного манипулятора с применением алгоритма муравьиных колоний – метаэвристического алгоритма, предназначенного для решения широкого класса задач на графах.

Алгоритм муравьиных колоний (АМК) был представлен бельгийским учёным Марко Дориго в ходе работы над докторской диссертацией и первоначально применён для решения задачи о коммивояжёре. В настоящее время АМК и его различные модификации применяются для решения широкого круга сложных оптимизационных задач.

Любой алгоритм муравьиных колоний представим следующим образом [1]:

– инициализировать начальные условия;
– пока (не выполнены условия выхода);
– инициализировать муравьёв;
– построить решения;
– обновить уровень феромона;
– дополнительные действия (опционально).

Под инициализацией начальных условий подразумевается задание параметров алгоритма, а также задание начального уровня феромона. Инициализация муравьёв есть размещение их в начальных вершинах графа и зависит от решаемой задачи.

В процессе построения решения муравей на каждом шаге совершает переход в следующую вершину, пока решение не будет удовлетворять некоторому критерию завершённости. Выбор вершины осуществляется по вероятностному правилу; вероятность перехода из текущей вершины i в смежную с ней вершину j определяется следующим образом:

$$p_{i,j} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{i,j}{}^{\alpha}\eta_{i,j}{}^{\beta}}{\sum\limits_{k \in S} \tau_{i,k}{}^{\alpha}\eta_{i,k}{}^{\beta}}, & j \in S, \\ 0, & j \notin S, \end{cases} \tag{1}$$

где $\tau_{i,j}$ – количество феромона на ребре между вершинами i, j, $\eta_{i,j}$ – эвристическая информация о ребре между вершинами i, j (например, обратное расстояние), α – параметр, регулирующий влияние феромона на выбор, β – параметр, регулирующий влияние эвристической информации на выбор, S – множество допустимых вершин, смежных с вершиной i.

После построения решения всеми муравьями происходит обновление феромона. При обновлении сначала происходит уменьшение уровня феромона на всех рёбрах пропорционально его количеству на ребре, а затем увеличение уровня феромона на рёбрах, использованных муравьями при построении решения. Количество феромона после обновления определяется следующим образом:

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1-\rho)\tau_{i,j}(t) + \sum_{k \in K_{i,j}} \frac{Q}{L_k}, \tag{2}$$

где $\tau_{i,j}(t)$ – количество феромона на ребре между вершинами i, j на итерации t; ρ – коэффициент испарения феромона (принимает значе-

ния от 0 до 1); $K_{i,j}$ – множество муравьёв, использовавших ребро между i, j при построении решения; Q – параметр, регулирующий общее количество откладываемого феромона; L_k – цена решения муравья k.

Для применения АМК к решению задачи планирования перемещения необходимо свести данную задачу к задаче о поиске кратчайшего пути в графе. Для этого строится граф-решётка $G(V, E)$, где $V \subset Z^3$ – множество вершин, соответствующих промежуточному положению рабочего органа манипулятора в пространстве; E – множество рёбер, задающих переходы между промежуточными положениями рабочего органа манипулятора. Вес ребра между вершинами i, j равен d, если возможен переход из промежуточного положения, соответствующего вершине i, в промежуточное положение, соответствующее вершине j, и $+\infty$ в противном случае; d – шаг решётки. Затем на построенном графе с помощью АМК производится решение задачи о кратчайшем пути. При инициализации муравьёв все муравьи располагаются в начальной вершине графа, соответствующей начальному положению рабочего органа, построение решения завершается по достижении муравьём вершины, соответствующей целевому положению рабочего органа.

Для реализации программного продукта было решено выбрать язык программирования Python 3 [2]. Основными достоинствами Python 3 являются простота и выразительность, широкий выбор библиотек, упрощающих разработку программных продуктов и повышающих эффективность их работы, возможность написания приложений, работающих под различными платформами без необходимости изменения исходного кода программы. В качестве физического движка с поддержкой необходимых функций, таких как решение обратной задачи кинематики, обработка столкновений, чтение данных о модели манипулятора и объектах внешней среды, использовалась библиотека Bullet, реализованная для использования с Python 3 в виде пакета PyBullet [3]; также использовались модули стандартной библиотеки json, csv для работы с JSON- и CSV-файлами.

С помощью реализованного программного продукта были проведены испытания при различных значениях параметров алгоритма, проанализированы полученные в ходе испытаний результаты. На основании полученных результатов определены диапазоны параметров алгоритма, при выборе значений параметров из которых найденные решения являются оптимальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dorigo M. Ant Colony Optimization / M. Dorigo, T. Stützle. – Cambridge, Mass: MIT Press, 2004. – 305 p.
2. Welcome to Python.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.python.org/ (дата обращения: 06.03.2020).
3. Bullet Real-Time Physics Simulation | Home of Bullet and PyBullet: physics simulation for games, visual effects, robotics and reinforcement learning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pybullet.org (дата обращения: 06.03.2020).

УДК 372.862

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ В ВИРТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ MS ROBOTIC DEVELOPER STUDIO ЛИГИ RESCUE SIMULATOR

В.В. Третьяков, В.С. Швоев, студенты; А.А. Изюмов, ассистент

Научный руководитель В.П. Коцубинский, к.т.н., доцент

г. Томск, каф. КСУП, ТУСУР, tretvl.work@gmail.com

Рассматриваются вопросы разработки, проверки и адаптации алгоритмов управления роботами. Обсуждаются необходимость комплексного подхода к решению поставленных задач при обучении по направлению «Информатика и вычислительная техника»; требование навыков не только в создании программного обеспечения, но и в проектировании аппаратуры для успешного преодоления препятствий.

Ключевые слова: мобильные роботы, моделирование движения.

Для освоения технических компетенций необходим практический навык. Участие в соревнованиях по робототехнике являются лучшим способом их приобретения. Обучение по направлению «Информатика и вычислительная техника» требует комплексного подхода к решению поставленных задач. От участников требуется навык не только в создании программного обеспечения, но и в проектировании аппаратуры для успешного преодоления препятствий.

Задачей лиги Rescue Simulator является разработка автоматического алгоритма управления роботом для езды по заранее известной местности, обнаружение и доставка объектов на специальные зоны выгрузки. За подбор и выгрузку объектов команда получает очки. Побеждает команда, набравшая наибольшее количество очков.

Для разработки и тестирования алгоритмов использовался MRDS (Microsoft Robotics Developer Studio). Данная программа является средой управления роботами и их симуляции. Для проведения соревнований Rescue Simulator устанавливается CoSpace Bot на базе MRDS.

Робот обладает тремя ультразвуковыми сенсорами, позволяющими ему измерять расстояние до объектов, компасом, дающим возможность ориентироваться по сторонам, и датчиками цвета, которые осуществляют считывание цвета поверхности под роботом.

Пример робота предоставлен на рис. 1.

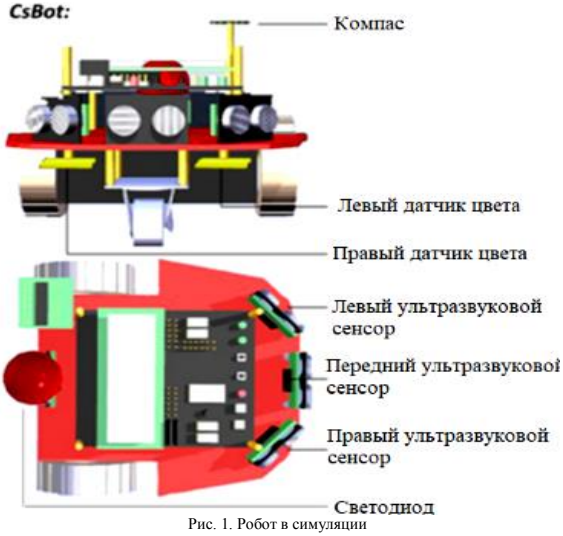


Рис. 1. Робот в симуляции

Для разработки алгоритма необходимо, чтобы робот получал входные данные от сенсоров и в зависимости от них выстраивал стратегию движения. Сам алгоритм может регулировать скорость вращения колес – колеса могут двигаться независимо друг от друга, а также задавать особые действия, такие как подбор и выгрузка объектов. Написание кода происходит на языке C с дальнейшим компилированием в DLL-файл. Проверка алгоритма осуществляется в виртуальном пространстве MRDS, симулирующем реальные условия. Если в результате проверки алгоритм выполняет поставленную задачу корректно, тогда файл записывается на флэш-накопитель и отдается судьям. Заключительный этап представляет собой выполнение алгоритма в соревновательных условиях.

Суть разрабатываемой программы заключается в использовании алгоритма конечных автоматов для того, чтобы робот, в случае обнаружения препятствий или других объектов, правильно и эффективно выполнял необходимые действия.

Конечный автомат описывается в виде пятерки множеств $M = (V, Q, q_0, F, f)$, где V – множество входных символов; Q – множество

внутренних состояний; q_0 – начальное состояние; f – функция переходов, которая определяет множество всех состояний, в которые из данного состояния возможен переход.

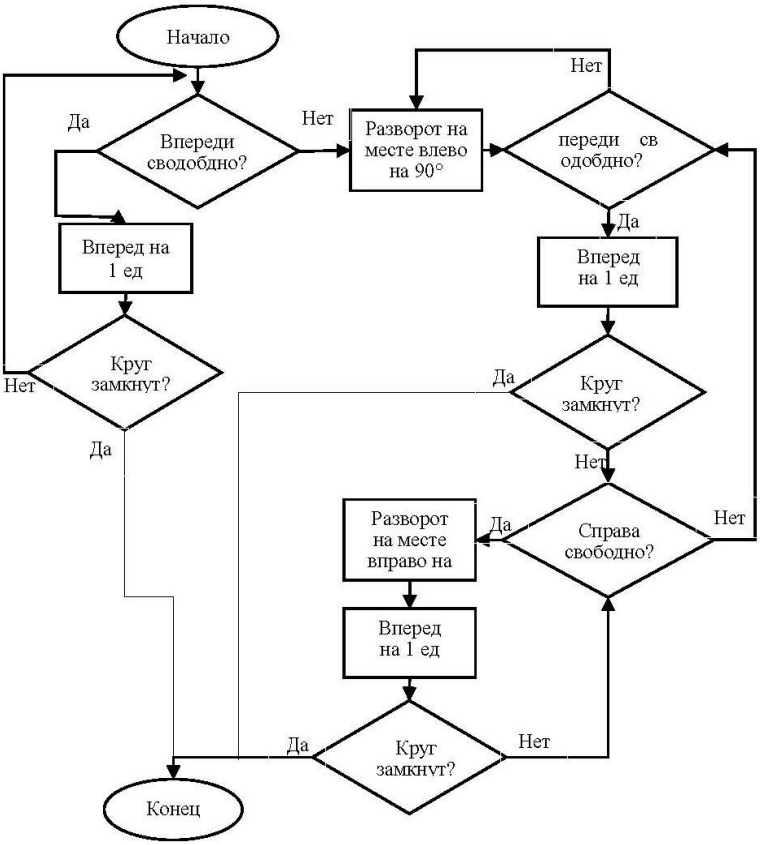


Рис. 2. Блок-схема прохода роботом одного круга

Для обучения факторов вероятностного автомата использовался генетический алгоритм. Генетические алгоритмы решают задачу оптимизации, используя механизмы, аналогичные естественному отбору в природе: отбор, размножение и мутации. Они достаточно просты в реализации и идеально подходят для решения типовой задачи обучения факторов переходов вероятностного автомата [3]. Несмотря на то, что первые работы, посвященные разработке и исследованию генетических алгоритмов, появились довольно давно, этот подход и сегодня не утратил своей актуальности [4].

Перед началом работы алгоритма в робот загружается карты местности и расположения зон с объектами в виде двумерного массива. После чего по алгоритму Дейкстры робот перемещается по карте в поиске объектов в определенных известных зонах.

Алгоритм Дейкстры описан в [5]. В качестве входных данных алгоритм получает взвешенный граф с неотрицательным весом рёбер. В результате работы алгоритма получается наикратчайший путь в данном графе. Принцип работы алгоритма заключается в том, что узлу графа сопоставляется метка, которая является стоимостью пути в этот узел из начального узла. Алгоритм работает пошагово – на каждом шаге он рассматривает один узел и пытается уменьшить значения метки смежных узлов. Работа алгоритма завершается, когда все узлы посещены.

Блок-схема прохода одного круга приведена на рис. 2.

Многократное участие на соревнованиях по робототехнике показало хорошее качество разработанного алгоритма, что позволило занять несколько призовых мест на крупных соревнованиях: второе место на соревновании RoboCup Russian Open, Томск–2019; первое место на соревновании RoboCup Asia-Pacific, Москва–2019.

ЛИТЕРАТУРА

1. Накано Э. Введение в робототехнику. – М.: Мир, 1988. – 335 с.

2. Василенко Н.В., Никитин К.Д., Пономарёв В.П., Смолин А.Ю. Основы робототехники: учеб. пособие для вузов. – Томск: РАСКО, 1993. – 474 с.

3. Михальченко Д.И., Ивин А.Г. Вероятностный метод построения машины состояний для модуля принятия решений в робототехнических системах // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 85–96.

4. Nourmohammadzadeh A., Hartmann S. The Fuel-Efficient Platooning of Heavy Duty Vehicles by Mathematical Programming and Genetic Algorithm // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 10071. – P. 46−57.

5. Dijkstra E.W. A note on two problems in connection with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – P. 269–271.

УДК 372.862

СИМУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А.А. Изюмов, ассистент; А.Е. Винник, студент;
Н.Ю. Хабибулина, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kvp@kcup.tusur.ru

Описана симуляция поведения робота в закрытом пространстве с возможностью появления препятствий в процессе движения.

Ключевые слова: мобильные роботы, моделирование движения, симуляция.

Для решения задачи самостоятельного движения робота к целевой точке в некотором ограниченном пространстве с вероятностным наличием препятствий было принято решение разделить её на три более узконаправленные задачи:

1) задача движения робота к целевой точке при отсутствии препятствий;

2) задача движения робота к целевой точке при наличии статических препятствий;

3) задача движения робота к целевой точке при динамически добавляющихся препятствиях.

При решении задачи движения робота к целевой точке при отсутствии препятствий были поставлены следующие условия:

– известны размеры поля;

– известно место начала движения;

– по краям поле огорожено стенами;

– считаем, что обнаруженный объект, имеющий цвет, является целевой точкой;

– известны угол обзора дальномера и его дальность, которые можно менять.

В момент каждого тика движения робот опрашивает датчик на наличие объекта перед ним. Если объекта или препятствия не было обнаружено, то робот движется вперед по направлению обзора.

В случае когда датчик сигнализирует о наличии объекта, происходит вычисление расстояния и направления до объекта. Затем на основе полученных данных вычисляется угловая и линейная скорость робота и формируется управляющее воздействие.

Если датчик сигнализирует о наличии препятствия, то при приближении к нему на некоторое расстояние происходит поворот направо.

Процесс обнаружения объекта и дальнейшее сближение с ним продемонстрированы на рис. 1.

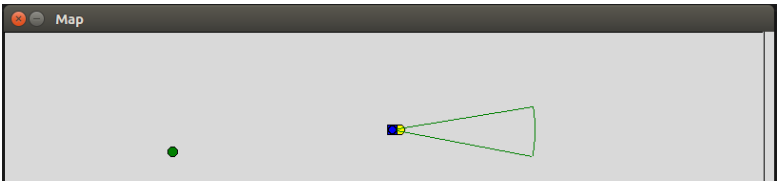


Рис. 1. Обнаружение объекта

В результате проведенной симуляции можно сделать вывод о том, что алгоритмы расчета управляющего воздействия и имитации поведения ультразвукового дальномера верны.

Для решения задачи движения робота к целевой точке при наличии статических препятствий введем следующие условия:

– известны размеры поля;

– известно место начала движения;

– по краям поле огорожено стенами;

– поле имеет статичные препятствия;

– обнаруженный объект, имеющий цвет, принимается в качестве целевой точки;

– известны угол обзора дальномера и его дальность, которые можно менять.

Движение меканум-робота в данной задаче схоже с тем, которое описано при решении задачи движения с вероятностным наличием препятствий. Момент обнаружения препятствия приведен на рис. 2.

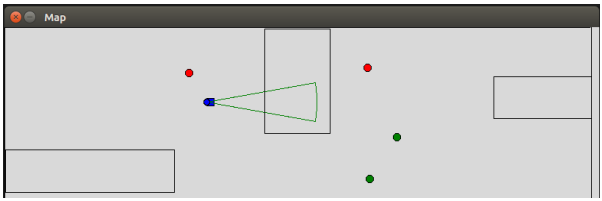


Рис. 2. Момент обнаружения препятствия

В результате данного эксперимента было доказано, что робот при обнаружении препятствия воспринимает его как стену и начинается двигаться в другом направлении согласно заданному управлению. Следовательно, алгоритмы работают не только для стен, располагающихся по периметру поля, но и для стен или препятствий, находящихся на самом поле.

Условия задачи движения робота к целевой точке при динамически добавляющихся препятствиях:

– известны размеры поля;

– известно место начала движения;

– поле огорожено стенами;

– на поле могут находиться как уже созданные препятствия, так и динамически добавляющиеся препятствия на пути следования робота к целевой точке;

– обнаруженный объект, имеющий цвет, является целевой точкой;

– известны угол обзора дальномера и его дальность, которые можно менять.

По мере продвижения может возникнуть два случая: первый – спроектированная ранее траектория проходит по препятствию или

второй – робот достиг конечной точки спрогнозированного пути. В этих двух случаях алгоритм строит новую траекторию движения до тех пор, пока робот не доедет до поставленной цели. Движение по разработанной траектории при приближении к препятствию приведено на рис. 3.

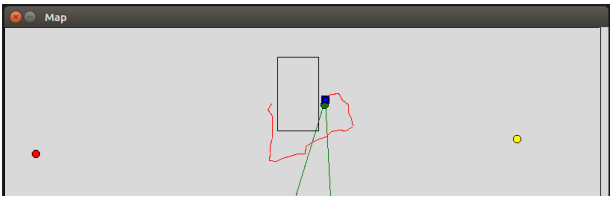


Рис. 3. Приближение к объекту

Как можно заметить, найденный путь не является оптимальным и в процессе расчета траектории движения робота не происходит поправок на формат-фактор самого робота. Данные проблемы являются задачами для дальнейшего рассмотрения.

Графики угловых скоростей колес и положение робота в пространстве приведены на рис. 4.

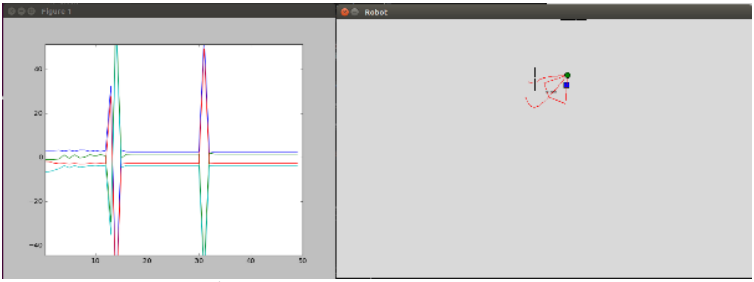


Рис. 4. Графики скоростей колес и положения робота в пространстве

Полученные данные являются идеализированными и не учитывают внешнее воздействие на робота, что может в свою очередь привести к некорректной работе робота. Для решения такого типа задач требуется создать более сложную адаптивную систему управления, которая бы производила оценку текущего состояния робота путем считывания данных с датчиков и по полученным данным синтезировала бы управляющее воздействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steven M. LaValle. Planning algorithms. – Cambridge University Press, 2016. – 512 p.

УДК 623.746.519

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА) ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ

И.А. Кремлев, инж. управления электроснабжения и АСУ ТП АО «ТомскНИПИнефть», аспирант ИШИТР НИ ТПУ

Научный руководитель А.В. Тырышкин, доцент ОАР ИШИТР, к.т.н.

г. Томск, АО «ТомскНИПИнефть», KremlevIA@tomsknipi,.ru

Проанализированы сферы применения БПЛА, их преимущества и недостатки, а также перспективы развития при использовании в инженерных изысканиях на нефтегазовых месторождениях.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, БПЛА, инженерные изыскания, аэрофотосъемка.

При возведении объектов капитального строительства в нефтегазовой отрасли особую важность приобретает своевременное выполнение инженерных изысканий. Ключевыми проблемами при выполнении инженерных изысканий являются недостаток квалифицированных кадров, низкое качество выполняемых работ, а также технологическое отставание изысканий от проектирования. В этой связи особую важность приобретает внедрение современной технологической инфраструктуры и цифровизации, в том числе применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Применение БПЛА в нефтегазовой отрасли. Беспилотный летательный аппарат – летательный аппарат без экипажа на борту, который управляется в полете оператором из пункта управления, автоматически или комбинирует оба метода. Фотовидеосъемка, связь, энергообеспечение и другие подсистемы беспилотных летательных аппаратов были заимствованы из смежных отраслей техники и адаптированы к применению. Внедрение в состав БПЛА дополнительных подсистем позволило расширить область применения данных аппаратов. Если ранее беспилотники применялись только для военных целей, то сейчас сфера их использования значительно расширилась [1].

Применительно к нефтегазовой отрасли БПЛА могут использоваться при выполнении следующих работ:

– мониторинг и наблюдение за состоянием трубопроводов;
– контроль промышленного производства;
– поиск и разведка нефтегазовых месторождений;
– экологический мониторинг атмосферных выбросов;
– выполнение инженерных изысканий.

Именно последний вид работ получил наибольшую популярность в последние несколько лет. Это связано с тем, что беспилотные летательные аппараты позволяют за минимально возможное время выпол-

нить съемку и последующую камеральную обработку материалов, а также создать топографический план местности. Сдерживающим фактором активного развития и внедрения беспилотников является отсутствие практического опыта их применения, а также высокая цена оборудования и программного обеспечения для обработки материалов.

При этом беспилотные летательные аппараты имеют ряд преимуществ по сравнению с другими видами аэрофотосъемки и полевых работ. Во-первых, оперативность: съемка с помощью квадрокоптера позволяет уменьшить длительность получения и обработки данных. Во-вторых, современная фотоаппаратура позволяет получить высокое разрешение съемки за счет высоты полета и отображения мельчайших особенностей рельефа. В-третьих, в качестве движущей силы аппарата, как правило, используются электрические двигатели, что соответствует принципам экологической безопасности [2].

Выполнение аэрофотосъемки при помощи БПЛА. Выполнение топографической съемки при помощи беспилотного летательного аппарата состоит из трех основных этапов:

– подготовительные работы;

– выполнение полетов;

– обработка полученных результатов.

В перечень подготовительных работ входят:

– первичный анализ территории съёмки, закрепление на местности границ и ключевых естественных наземных ориентиров, планирование количества и продолжительности полётов;

– согласование использования воздушного пространства над объектом съёмки;

– создание планово-высотного обоснования в целях обеспечения требуемой точности [3].

Выполнение полетов осуществляется двумя способами – автоматически по заданной траектории или при помощи оператора. Связь между контроллером и беспилотным летательным аппаратом осуществляется через радиомодем. После подъема на необходимую высоту БПЛА выполняет фотовидеосъемку с необходимой скоростью (обычно раз в секунду). По завершении сеанса полета выполняется импорт полученных снимков [4].

Обработка полученных результатов выполняется в специализированном программном обеспечении (PHOTOMOD, PhotoScan и т.д.). На выходе получаются цифровые модели рельефа и местности, а также файлы для построения и обрисовки топографического плана.

Заключение. В Российской Федерации уже сейчас большинство нефтегазовых компаний применяют БПЛА для выполнения мониторинга нефтепроводов и инженерных изысканий. С учетом того, как

быстро движется технический прогресс в области создания беспилотных летательных аппаратов, в ближайшем будущем они смогут вытеснить значительную часть традиционного транспорта и рабочей силы [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шихмагомедова С.М. Использование беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2017. – № 6-2. – С. 48–50.

2. Хан В.Д., Кугаевский В.И. Сравнительный анализ точности геодезических работ при их выполнении с помощью БПЛА «Gatewing X100» и наземной сканирующей установки «Riegl VZ-1000» // Интерэкспо Гео-Сибирь. – Новосибирск, 2013. – № 3. – С. 111–115.

3. Попова Л.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в условиях Крайнего Севера // Молодой ученый. – Казань, 2016. – № 24. – С. 105–108.

4. Прокопьев И.В., Бецков А.В. Структура системы управления беспилотных летательных аппаратов специального назначения // Надежность и качество. – Пенза, 2012. – № 1. – С. 15–20.

5. Саяпова В.В., Уразбахтин Р.Р. Мониторинг химических объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов // Современные научные исследования и разработки. – Астрахань, 2017. – № 4. – С. 260–262.

УДК 621.74

РАЗРАБОТКА ШИРОКОФОРМАТНОГО УСТРОЙСТВА С ЧПУ ДЛЯ ПЕЧАТИ ОБЪЕКТОВ ФОТОПОЛИМЕРНЫМИ ЧЕРНИЛАМИ

Д.А. Мяхор, аспирант каф. АВТ

Научный руководитель В.А. Жмудь, доцент каф. АВТ, д.т.н.

г. Новосибирск, НГТУ, MyDiAl2009@gmail.com

Описан принцип работы и конструктивных особенностей широкоформатного устройства для печати объектов фотополимерными чернилами.

Ключевые слова: 3D-принтер, ЧПУ, аддитивные технологии, фотополимерные чернила.

В наше время технологии аддитивного производства получили весьма широкое распространение в разных сферах деятельности. Подавляющее большинство 3D-принтеров обладают классической конструкцией со своими недостатками: ограниченная область печати по всем осям из-за неподвижного корпуса, сложность автоматической дозаправки без приостановки печати, использование требующего нагрева ABS/PLA-пластика приводит к выделению вредных веществ. Чтобы решить представленные проблемы, в рамках данной работы было спроектировано широкоформатное устройство с числовым про-

граммным управлением, использующее в качестве материала для печати жидкие фотополимерные чернила, затвердевающие на ультрафиолетовом свете. Описанию принципа работы и конструктивных особенностей проекта посвящена настоящая статья.

Корпус для прототипа устройства спроектирован из фанеры 3-миллиметровой толщины. Выбор данного материала обусловлен его дешевизной, простотой обработки, достаточной прочностью и малым весом. Детали принтера разработаны с учётом требований для их изготовления на лазерном гравировальном станке MINIMO 0503: малая толщина, не превышающая предельную глубину резки в 6 мм, максимальный размер ширины и длины в пределах рабочей области станка 500×300 мм, фанера крайне слабо отражает лазерное излучение и хорошо поддаётся обработке. Для уменьшения массы прототипа предусмотрены технологические вырезы во всех деталях, не критичных к механическим нагрузкам. Широкоформатность разработки достигается за счёт использования колёсного шасси вдоль продольной оси печати. Оно включает в себя: *два колеса* из 6-миллиметровой фанеры с резиновым кольцом для увеличения трения между устройством и поверхностью, на которой будет производиться печать: большее трение даст более точный результат печати; *четыре металлических шарикоподшипниковые опоры* XSD88, способствующие стабильному передвижению принтера. Для контроля точности перемещения посредством обратной связи на каждом колесе установлен одометрический датчик, состоящий из колеса малого диаметра с перфорацией, а также свето- и фотодиодов.

Механизм, представленный на рис. 1, предназначен для перемещения печатающей головки в двух плоскостях: вдоль поперечной оси и по высоте. Поперечное перемещение осуществляется посредством ремённой передачи: силиконовый ремень с односторонней ребристой поверхностью натянут между двумя валиками из ABS-пластика. Валики приводятся в движение металлическим мотор-редуктором N20, работающим на напряжении питания 6 В постоянного тока. С двух противоположных сторон валики и ремень прикрыты кожухами из ABS-пластика, в которых предусмотрены отверстия с резьбой для металлических направляющих, осуществляющих перемещение печатающей головки по высоте. Вращение каждой из направляющих независимо и осуществляется шаговыми двигателями 28BYJ-48.

Управление электрическими компонентами проекта будет осуществляться специально спроектированной платой на базе микроконтроллера с малым энергопотреблением ATmega 328P, обладающе-

го 8-битным процессором, 32 килобайтами флеш-памяти, 6-канальным ЦАП, а также портами USART, I2C, SPI [1].

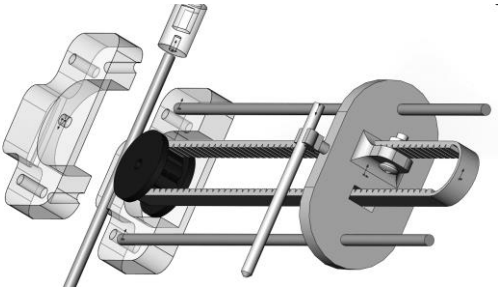


Рис. 1. Строение печатающего механизма

Принтер рассчитан на печать специальными фотополимерными чернилами, которые используется в 3D-ручках CreoPop. Процесс печати можно охарактеризовать следующим образом: из ёмкости, расположенной в верхней части принтера, под действием сжатого воздуха чернила через систему трубок поступают в сопло печатающей головки. У её основания располагаются несколько ультрафиолетовых светодиодов. Когда из сопла материал попадает на поверхность печати, он подвергается засвечиванию и твердеет [2]. Скорость движения принтера будет подобрана таким образом, чтобы было достаточно времени для завершения процесса полимеризации чернил. Печать происходит послойно, а траектория движения принтера заранее рассчитывается специальным программным обеспечением. Внешний вид проекта представлен на рис. 2.

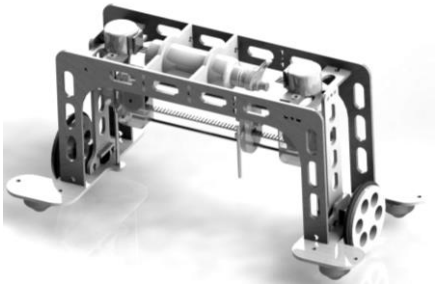


Рис. 2. Внешний вид разработанного принтера

В ходе данной работы спроектировано широкоформатное устройство с числовым программным управлением для печати различных объектов фотополимерными чернилами. Рассмотрены конструктивные особенности принтера и общий принцип его работы. В

дальнейшем планируется изготовление реального прототипа, совершенствование конструкции, а также проработка концепции фотополимерной печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А.В. Микроконтроллеры AVR от азов программирования до создания практических устройств. – СПб.: Наука и техника, 2016. – 544 с.

2. 3D-ручка CreoPop, рисующая светоотверждаемыми чернилами // Habr [Электронный ресурс]. Коллект. блог с элем. новост. сайта. – 2016. – URL: https://habr.com/ru/company/dadget/blog/369959/ (дата обращения: 13.01.2020).

УДК 007.51

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

[1]Ю.О. Лобода, [2]З.А. Гасымов, [1]А.Ю. Любимов

г. Томск, [1]ТУСУР, [2]СибГМУ, iamgasymov@gmail.com

Разработан программно-аппаратной комплекс для детей с расстройствами аутистического спектра, их родителей и педагогов, осуществляющих инклюзию.

Ключевые слова: аутизм, нейроинтерфейс, РАС, ЭЭГ.

Расстройства аутистического спектра (РАС) в России имеют высокую распространенность: около 1% детей (письмо Министерства здравоохранения РФ №15-3/10/1-2140 от 8 мая 2013 г.), всего в России 31 715 000 детей (по данным Росстата на начало 2016 г.), а значит, примерно 317 150 (1%) из них живут с РАС. В других странах эта проблема также актуальна: по данным медицинской статистики США (CDC) и Великобритании (NHS), более 1% детей имеют РАС. Проблемой является то, что родители не имеют полной информации о рисках РАС, не видят тревожных симптомов, не обращаются к педиатрам. В России сегодня диагностировано менее 10% (порядка 10 000) детей с РАС. Ещё одной проблемой является социальная адаптация, дети с РАС, как правило, не вписываются в условия детского сада и школы, потому что их основные проблемы – поведенческие.

Особенно актуальны следующие проблемы: синдром РАС индивидуален; не хватает верифицированных данных; более 90% детей с аутизмом в России не получают квалифицированной помощи врачей и педагогов; острая нехватка квалифицированных специалистов; необходимость постоянного присутствия взрослого.

Цель исследования. Создание программно-аппаратного комплекса (ПАК) для детей с РАС, их родителей и педагогов. ПАК позволит проводить дополнительный мониторинг психофизиологического

состояния ребёнка, выстраивать индивидуальную образовательную траекторию и, таким образом, реализовывать эффективную инклюзию. Robotic ASD Satellite (RAS) – робототехнический аппаратно-программный комплекс, который помогает в организации самостоятельных занятий ребёнка с расстройствами аутистического спектра (РАС). Комплекс предназначен для использования в центрах, специализирующихся на помощи детям с РАС.

Материалы и методы. Комплекс: датчики, фиксирующие в динамике биометрические параметры ребёнка; робот-помощник, компьютер с настроенной обучающей системой, система оповещения родителей и педагогов. Робот с программным обеспечением реализован на Wiring (Arduino IDE) + Python, ЭЭГ (Нейроинтерфейс) осуществляется в MuseDirect. Камера позволяет реализовывать возможность распознавания выражения лица (keras, openCV). Датчики – Wiring (Arduino IDE) + Python.

Принцип модульности позволяет разработать адаптивное решение для каждого конкретного ребёнка. Комплекс автоматизирует процесс фиксации реакций ребенка. Комплекс ведёт постоянный мониторинг во время занятий, за счет этого достигается экономия до 50% времени работы специалистов, снижение трудозатрат.

Компания ООО «Нейромех» в рамках импортозамещения также разработала собственный нейроинтерфейс, который является аналогом нейроинтерфейса Muse и может использоваться в комплексе. Комплекс, используя разработанные технические устройства, может своевременно подавать сигнал взрослому о нежелательном состоянии ребёнка.

Этап 1. Запись данных. Сравниваемые устройства: «Muse» и «Нейроинтерфейс». На начальном этапе проводились записи с двух различных устройств с целью анализа и проверки точности полученных результатов.

Этап 2. Запись данных. Рассмотрим полученные данные.

Эксперимент 1. Время записи 60 с. С 30 по 40 с время действия (интенсивное моргание).

Обработка данных проводилась в системе математического моделирования Matlab при помощи специализированного пакета вейвлет-преобразований. Данное преобразование позволяет оценить частотный спектр сигнала, а также определять момент времени, в котором появилась та или иная гармоника. На первом этапе обрабатывались данные в «сыром» виде, т.е. до шумоподавления. Второй этап включал себя использование вейвлет-преобразования 3-го порядка.

Эксперимент № 2. Время записи 120 с.

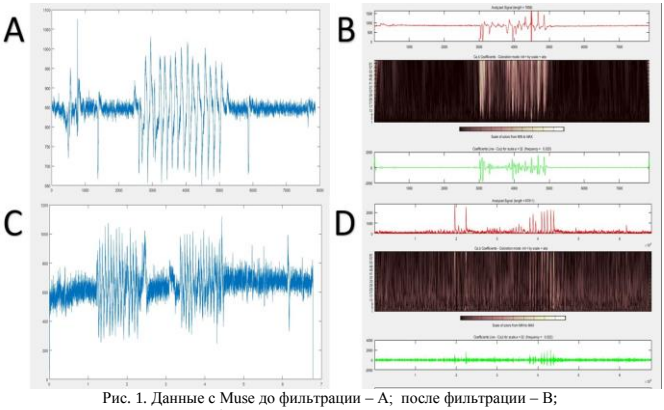


Рис. 1. Данные с Muse до фильтрации – A; после фильтрации – B;
данные «Нейроинтерфейса» до обработки – C; данные после обработки – D

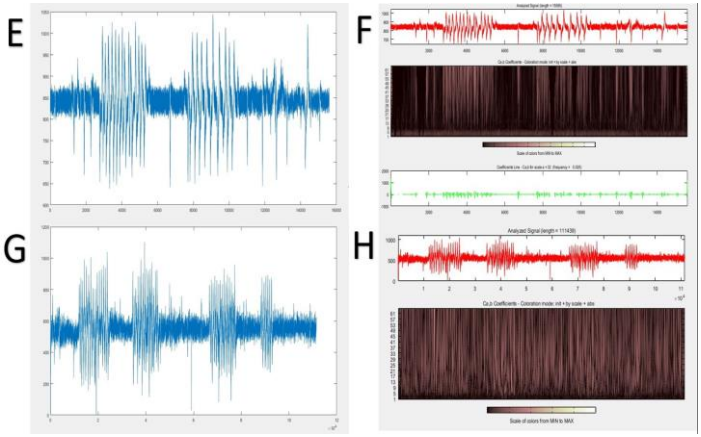


Рис. 2. Данные Muse до обработки – E; после обработки – F;
данные «Нейроинтерфейса» до обработки – G; после обработки – H

По итогам обработки получены следующие данные.

1. Частота дискретизации «Нейроинтерфейса» составляет около 10 кГц, что является значительно больше, чем у «Muse».

2. Амплитуда сигнала во время выполнения действия изменяется в диапазоне от 580–620 мкВ.

3. Чередование светлых и темных областей соответствует изменению уровня сигнала. Переход между двумя и черными полосами соответствует переходу между минимумом и максимумом функции (полупериод), что позволяет определить, в какой момент времени началось и закончилось действие.

Результаты исследования. Подводя итоги, следует отметить, что результаты обработки подтвердили правильность выполнения устройства «Нейроинтерфейс». Компанией ООО «НейроМех» также разработан робот для индивидуальной работы с комплексом. Для родителей в мобильном приложении реализована система с обратной связью для контроля состояния ребенка. Для педагогов – организация эффективного инклюзивного образования. Проводится апробация комплекса RAS в междисциплинарном центре прикладного анализа поведения (МЦПАП НГУ) и в школе «Перспектива» г. Томска.

Выводы. Реализация программно-аппаратного комплекса будет полезна детям с РАС, их родителям и педагогам и, по мнению специалистов, позволит обеспечить более высокую сохранность семей, воспитывающих детей с РАС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григоренко Е.Л. Расстройства аутистического спектра. Вводный курс: учеб. пособие для студентов. – М.: Практика, 2018. – 280 с.

2. Как проявляются симптомы расстройств аутистического спектра (РАС) у детей раннего возраста: пособие для родителей, семьи и друзей. – М.: Фонд «Выход», 2014. – 36 с.

УДК 004.4

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ПАЦИЕНТ»

Г.К. Ноздрин, студент каф. УИ

Научный руководитель В.В. Дацюк, программист ООО «Элекард-Мед»

г. Томск, ТУСУР, georgiynozdrin@gmail.com

Обосновываются необходимость и подходы к разработке «Виртуальных пациентов». Описана структура разрабатываемой платформы и требования к ней.

Ключевые слова: виртуальный пациент, информационная система.

Медицинские знания быстро расширяются, что требует не только более эффективных методов преподавания, но и преподавания управления знаниями, однако лекции и книги остаются основным средством обучения во многих медицинских школах. Проблема диагностических и аналитических ошибок [1] при оказании медицинской помощи предполагает, что медицинское образование должно в большей степени ориентироваться на применение основополагающих знаний в различных контекстах для содействия развитию диагностического опыта обучающегося.

Внедрение технологий в образовательный процесс открывает новые перспективы для решения проблем в данной области. Часто использование современных технологий даёт больший результат, чем уже существующие решения, это касается и использования образовательных технологий в процессе медицинского обучения.

Виртуальные пациенты уже много лет используются в различных отраслях образования и исследований: в здравоохранительном образовании, электронных моделях пациентов и клинических исследованиях. В области образования термин «виртуальный пациент» трактуется по-разному. Часто цитируемое и наиболее конкретное определение Американской ассоциации медицинских колледжей (AAMC) определяет виртуальных пациентов как «конкретный тип компьютерной программы, имитирующей реальные клинические сценарии. Учащиеся имитируют роль медицинских работников для проведения физического обследования и принятия диагностических и терапевтических решений» [2]. В противовес четкому определению существует классификация виртуальных пациентов по различным факторам (наличие у сценария ветвления, интерактивное взаимодействие, наличие обратной связи и т.п.) [3]. Мы рассматриваем ВП как систему, состоящую из интерактивных сценариев, каждый из которых представляет одного пациента.

На текущий момент сформированы некоторые обобщенные требования к разрабатываемой платформе, выполнение которых позволит на следующих этапах приступить к разработке ВП с высокой эффективностью. Система должна:

- иметь масштабируемое и структурированное хранилище данных;
- предоставлять возможность внесения данных пациентов в хранилище, в виде, не вызывающем трудностей у человека без инженерного образования (эксперта);
- иметь отделённую от остальных подсистему взаимодействия с пользователем;
- иметь «прослойку» между подсистемой взаимодействия с пользователем и хранилищем данных, которая будет отвечать за обработку данных и безопасность;
- иметь внешний интерфейс для предоставления доступа к статистическим данным и данным об обучающихся.

Структура платформы с учетом вышеуказанных требований показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой платформы

Со стороны работника медицинского учреждения или эЭксперта, обязанностью которого в данной системе является предоставление данных реальных пациентов, входной точкой системы является файловый сервер, на котором расположены необработанные структурированные данные. Структура этих данных представляет собой заранее обговоренный формат расположения текстовых и медиафайлов в каталогах файловой системы. Такой подход решает несколько задач:

- нет привязки к операционной системе;
- привычный обычному пользователю ПК формат хранения данных;
- нет необходимости разрабатывать дополнительное приложение для администрирования процесса добавления новых данных, что по сути является отдельной от разработки виртуального пациента трудоёмкой задачей.

После того как информация попадает на файловый сервер, она считывается парсером, который проверяет данные на правильность заполнения, структурирует их в формат, удобный для передачи, и заполняет хранилище. Хранилищем данных в данном случае является реляционная база данных, которая содержит разделенные и нормализованные сущности.

Со стороны пользователя (обучающийся, наставник) входной точкой в системе является WEB-приложение. Реализация графического представления платформы в виде WEB-приложения решает следующие задачи:

- нет привязки к операционной системе;
- нет привязки к устройству, с которого работают с приложением;
- есть возможность быстрого конвертирования платформы в программу для PC или Android;

• есть возможность асинхронной работы с состоянием приложения (например, загрузки данных, которые еще не видны).

Посредником между WEB-приложением и хранилищем данных является сервер. Он отвечает за маршрутизацию, аутентификацию, авторизацию, безопасность и предоставление внешних интерфейсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abimanyi-Ochom J., Mudiyanselage Sh. B., Catchpool M. et al. Watts. Strategies to reduce diagnostic errors: a systematic review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1186/s12911-019-0901-1 (дата обращения: 20.10.2019).

2. Cook D.A., Friedman C.P., Greene P.S et al. Effective Use of Educational Technology in Medical Education [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://store.aamc.org/downloadable/download/sample/sample_id/111/ (дата обращения: 02.11.2019).

3. Huwendiek S., De leng B.A., Zary N. et al. Towards a typology of virtual patients // Medical Teacher. – 2009. – P. 743–748.

УДК 618.518.5

КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИНЫ НА BLUETOOTH УПРАВЛЕНИИ

А.В. Кривобородько, В.А. Присяжнюк,
Е.Д. Савельев, А.В. Кретов, студенты
Научный руководитель Н.В. Ливенцова, доцент каф. ЭАФУ ФТИ
г. Томск, ТПУ, aleksey.kretov.00@mail.ru

Создано устройство, предназначенное для развлечений. Оператор способен управлять устройством в режиме реального времени на расстоянии 10 м. Устройство способно двигаться вперёд и назад, совершать повороты.

Ключевые слова: физическая модель, монтажная схема, машина, датчик, алгоритм, приложение.

Актуальность проекта обусловлена объединением двух популярных сфер – игрушки и технологии управления аппаратами на расстоянии.

Цель: реализовать проект «Машинка на Bluetooth управлении», итоговым продуктом которого является машина, управляемая через приложение на телефоне посредством Bluetooth.

Создание рабочего устройства проводилось в несколько этапов:

1. Анализ аналогичных устройств и их программного обеспечения.
2. Выбор оптимальных деталей.
3. Подключение деталей и проверка их работоспособности.
4. Корректировка кода устройства.
5. Создание приложения для управления через телефон.
6. Сборка рабочей модели.

Проект создан на основе Arduino Nano. Для управления машинкой были созданы 2 H-моста из транзисторов TIP122. Схема подключения представлена на рис. 1.

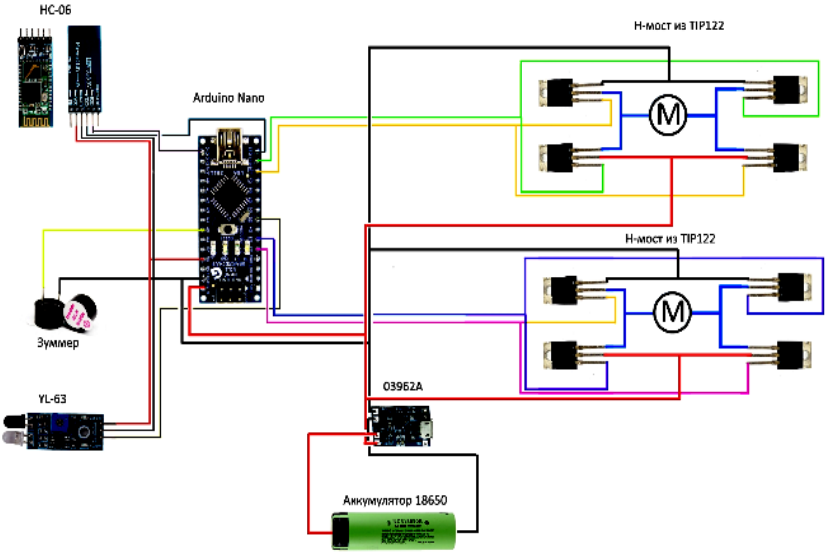


Рис. 1. Монтажная схема подключения силовой и управляющей части

Принцип действия машинки на Bluetooth управлении состоит в передаче управляющего сигнала с телефона на Bluetooth модуль, связанный с платой Arduino Nano. Программа, загруженная на Arduino, обрабатывает полученный сигнал и передаёт его драйверу моторчика посредством ШИМ-сигнала, который отвечает за их скорость вращения, что обеспечивает передвижение устройства. Машина способна проработать не менее 20 мин.

Управление машиной на расстоянии осуществлено с помощью простого клиент-серверного приложения. Оно создавалось на специальном онлайн ресурсе-конструкторе MIT app inventor. Дизайн представлен на рис. 2.

К текущему моменту интерфейс программы представляет собой функциональный пульт со следующими возможностями:

- Два стика для перемещения машины в пространстве (влево, вправо, вперёд, назад).
- Кнопка поиска смартфона для последующего подключения к нему.
- Кнопка для пользовательских настроек приложения.

В дальнейшем планируется установка инфракрасного датчика препятствия YL-63 и добавление функции объезда препятствия.

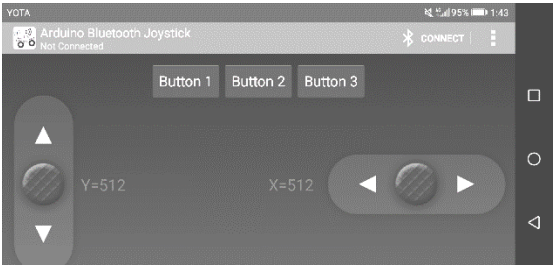


Рис. 2. Дизайн приложения для телефона

В ходе работы реализован работоспособный проект с использованием Arduino Nano. Подобраны оптимальные компоненты, произведена отладка программы под Arduino Nano, создано приложение для телефона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уроки по работе с микроконтроллером Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://alexgyver.ru/arduino_lessons/ (дата обращения: 05.03.2020).

УДК 372.862

ЗАХВАТ ОБЪЕКТА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ С МАНИПУЛЯТОРОМ НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560

А.А. Изюмов, ассистент; И.А. Шестеров, студент;
Ю.А. Шурыгин, проф. каф. КСУП, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kvp@kcup.tusur.ru

Описана разработка приложения по управлению робототехнической платформой.

Ключевые слова: мобильные роботы, захват объекта, Arduiono Mega.

Вследствие решения задачи написания алгоритмов движения механической руки [1] разработана последовательность, приведенная на рис. 1. Робот должен опускать смыкающийся захват на уровень поверхности, на котором стоит его основная конструкция, далее захватить небольшой объект, предоставляемый по условиям тестирования, поднять захват с объектом чуть выше основания манипулятора, развернуться на 180° до кормы робота, слегка опустить руку-манипулятор и сбросить удерживаемый объект в условную корзину.

Все возможные варианты использования программы по управлению манипулятором продемонстрированы на рис. 2.

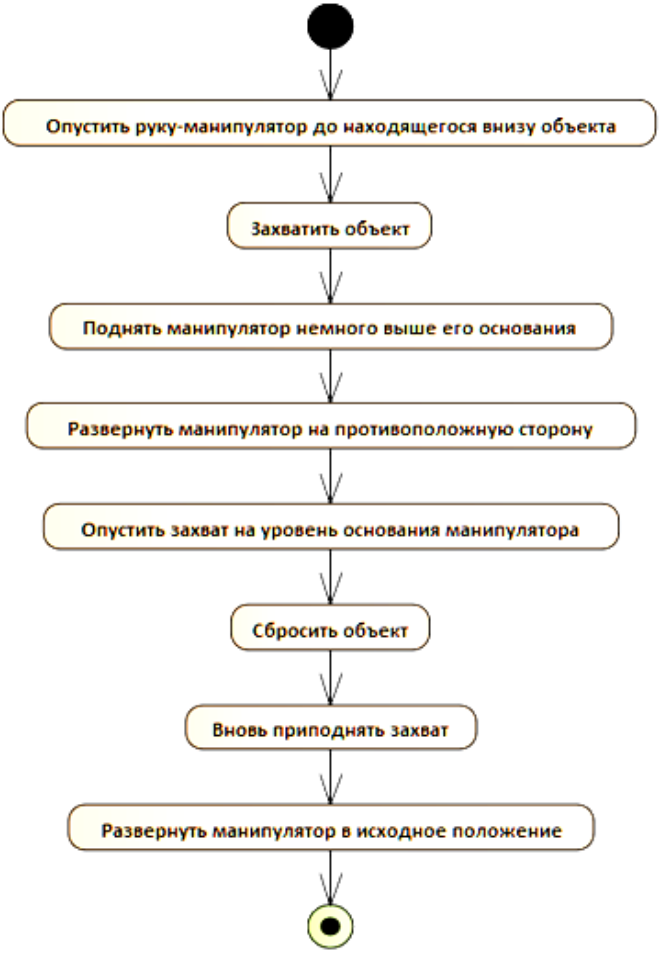


Рис. 1. Диаграмма деятельности порядка захвата объекта

Основной проблемой при реализации алгоритмов движения манипулятора является подгонка каждого отдельного элемента конструкции руки под соответствующий ему сервопривод, что подразумевает правильное позиционирование места крепежа детали под головку ротора, когда тот находится на «нулевом» градусе. При соединении этих звеньев нужно учитывать диапазон вращения привода относительно «нуля», а также возможные конструктивные мёртвые зоны, где, в попытке провернуться, может выйти из строя поворотный механизм.

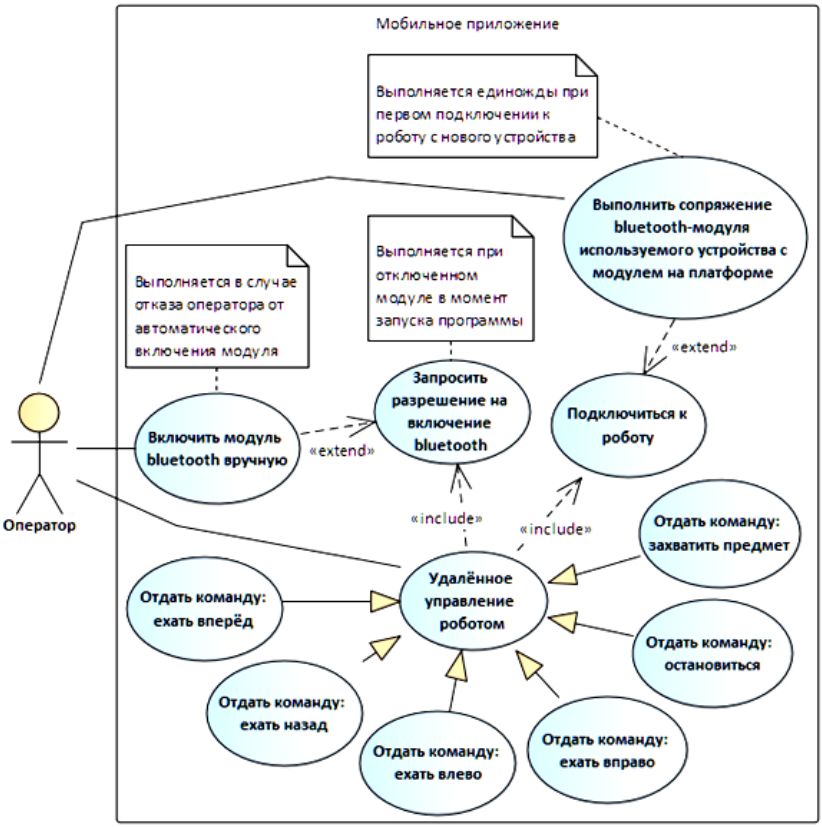


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования приложения

Пример: есть сервопривод, вращающий весь манипулятор по оси, перпендикулярной его основанию (т.е. влево, вправо, назад относительно шасси робота), при этом привод имеет ограничение поворота в 220º, и если руку нужно поворачивать назад до кормы робота, то «нулевой» градус должен находиться чётко перпендикулярно направлению движения платформы, т.е. со стороны колёс по правому или левому борту.

Далее нужно выяснить, какой длительности должен быть ШИМ-сигнал, чтобы повернуть сервопривод на пять, десять, двадцать градусов и т.д., в данном случае узнать длительность пульсаций, необходимых для поворота головки на –90 и 90° (повернуть манипулятор назад и вперёд), иными словами, необходимо проградуировать сервопривод для облегчения дальнейшего написания алгоритмов. Стоит учитывать,

```
//Сжатие "клешни".
Set(4, 95);
delay(1000);
//Поднять руку.
Set(2, 10);
delay(500);
Set(1, 140);
delay(1000);
//Поворот налево.
Set(0, 180);
delay(1500);
//Опустить руку для выброса объекта в хранилище.
Set(2, 60);
delay(100);
Set(1, 110);
delay(100);
Set(2, 80);
delay(100);
Set(1, 80);
delay(750);
void StormWheel::MovingStraight(int direction)
{
            if ((direction == 1) || (direction == 2) || (direction  == 5))
            {
               switch (direction)
               {
                   case 5:   //Остановка
                   for (currentSpeed; currentSpeed > MINSPEED; currentSpeed-=5)
                   {
                     SetSpeed(currentSpeed);
                     delay(5);
                   }
                   SetDirection(direction);
                   break;
                   default:  //Запуск
                   SetDirection(direction);
                   if (currentSpeed < MINSPEED) currentSpeed =  MINSPEED;
                  for (currentSpeed; currentSpeed <= maxSpeed; currentSpeed+=5)
                  {
                     SetSpeed(currentSpeed);
                     delay(5);
                   }
                   break;
               }
          }
}
```

Рис. 3. Листинг программы

что с резким запуском моторов, также скачкообразно, на короткий момент времени, вырастает ток в цепи, на два-три раза превышающий номинальное потребление двигателями. Во избежание перегрузок питающее напряжение стоит наращивать постепенно. Код, описывающий управление манипулятором и плавный пуск, приведен на рис. 3.

Программа по удаленному управлению платформой на испытаниях показала стабильную работу и точное выполнение основной функции по дистанционной отправке команд роботу, что является полноценной реализацией ручного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестеров И.А. Робототехническая платформа с механическим манипулятором на базе Arduino Mega 2560 // Матер. конф. «Научная сессия ТУСУР–2018». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 141–145.

УДК 372.862

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГРАДУИРОВКИ ПРИВОДОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С МАНИПУЛЯТОРОМ НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560

А.А. Изюмов, ассистент; И.А. Шестеров, студент;
В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kvp@kcup.tusur.ru

Описана проблема градуировки сервоприводов робототехнической платформы при разработке приложения по дистанционному управлению.

Ключевые слова: управление, роботехника, градуировка сервопривода, мобильные роботы, симуляция движения.

Для корректного управления роботехнической платформой [1] необходимо задействовать установленную плату расширения для управления сервоприводами, требуется установить библиотеку Adafruit_PWMServoDriver, которая предоставляет функции инициализации настроек платы и корректной отправки сигнала подключенным приводам.

Для градуировки приводов необходимо написать функцию, представленную на рис. 1.

Здесь на функцию Set первой переменной подаётся номер привода относительно портов на плате расширения (приведённый в примере выше привод установлен в порт под номером ноль), а во вторую переменную подаётся значение градуса, на который необходимо выставить выбранный сервопривод.

```
void DeathClaw::Set(int servoNumber, int degrees)
{
int pulseLenght;       //Продолжительность пульсаций, подаваемых в ротор.
switch (servoNumber)
  {
   case 0:
   pulseLenght = map(degrees, 0, 220, SERVOMIN_MAGIC_Q,
   SERVOMAX_MAGIC_Q);
            //Расчёт пульсаций для
            горизонтального ротора.
            Рабочая зона привода от 0 до 220 градусов.
    servo.setPWM(servoNumber, 0, pulseLenght);
                    //Подача рассчитанных пульсаций
                      на ротор горизонтального
                      движения. Начальная позиция -
                      90 градусов.
   break;
   default:
   pulseLenght = map(degrees, 0, 120, SERVOMIN_TOWERPRO,
    SERVOMAX_TOWERPRO);  //Расчёт пульсаций для роторов,
                      отличных от горизонтального.
                      Рабочая зона роторов
                      принимается от 0 до 120.
    servo.setPWM(servoNumber, 0, pulseLenght);
    break;
    } }
```

Рис. 1. Функция градуировки сервоприводов

Так как диапазон горизонтального привода отличается от остальных, то расчёт требуемых ему пульсаций выведен в отдельный кейс.

Важную роль при пересчёте выполняет функция map, которая переводит входное значение (degree – градус) с масштабов первого диапазона (второе и третье число – диапазон привода) к масштабам второго диапазона (четвёртая и пятая переменные – минимальная и максимальная продолжительность пульсаций). Полученное число передаётся на функцию setPWM, что сообщает плате управления сервоприводами о подаче сигнала продолжительностью pulseLenght с начала такта на обозначенный привод.

Граничные значения длин пульсаций для каждого привода определялись методом перебора различных значений. Полученные величины приведены на рис. 2.

После написания функции Set вся остальная работа сводится к построению алгоритма пошагового движения, т.е. нужно мысленно вообразить опорные точки в пространстве относительно манипулято-

ра, которые тот должен пройти или на которых он должен остановиться. Каждая такая точка является результатом постановки сервопривода на определённый угол или постановки группы сервоприводов на нужные позиции, что и реализуется функцией Set. После каждого вызова функции Set желательно оставлять паузу для того, чтобы выбранный привод успел установиться на свою позицию до запуска другого привода, это позволит снизить токовую нагрузку на систему и сделает движения манипулятора предсказуемыми.

```
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>
class DeathClaw
{
private: const int SERVOMIN_MAGIC_Q = 150;        //Минимальная длительность пульсаций горизонтального привода.
private: const int SERVOMAX_MAGIC_Q = 570;        //Максимальная длительность пульсаций горизонтального привода.
private: const int SERVOMIN_TOWERPRO = 185;       //Минимальная длительность пульсаций четырёх оставшихся приводов (плечо, "клешня", вращение "клешни").
private: const int SERVOMAX_TOWERPRO = 955;       //Максимальная длительность пульсаций четырёх оставшихся приводов (плечо, "клешня", вращение "клешни").
```

Рис. 2. Значения величин пульсации

Для облегчения работы с сервоприводами их реально допустимые диапазоны вращения, с учётом конструктивных особенностей манипулятора, принимаются, в коде программы как положительные числа, начинающиеся от нуля.

В качестве примера управления платформой на рис. 3 приведена команда, сообщающая платформе, что нужно запустить алгоритмы манипулятора на захват объекта.

```
void __fastcall TConceptForm::GetButtonClick(TObject *Sender)
{
  try
  {
     command = TEncoding::UTF8->GetBytes(10);
     Socket->SendData(command);
     DisabledControls(this);
     LoadingTimer->Enabled = true;
   }
   catch (Exception &Except)
  {
     Socket->Close();
   }
}
```

Рис. 3. Отправка сигнала на взятие объекта

Приложение отправляет ключевое число «10» в однобайтовом формате, что воспринимается внутренней программой робота как корректное сообщение, являющее собою выполнение условия для перехода на выполнение цикла подбора предмета механизированным манипулятором.

Все команды для робота представлены как условные числа с диапазоном доступных значений от 0 до 255. Таким образом, информационная оставляющая отправляемых пакетов от устройства к роботу максимально сжата до размеров одного байта, что способствует уменьшению необходимого времени на кодировку, отправление и обработку сигнала, вследствие чего снижается общая задержка при управлении роботом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестеров И.А. Робототехническая платформа с механическим манипулятором на базе Arduino Mega 2560 // Матер. конф. «Научная сессия ТУСУР–2018». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 141–145.

УДК 621.914.31

РОБОТ-ЧЕРТЕЖНИК

А.Д. Громов, В.В. Наркевич, А.Б. Тогузбаева, Д.Д. Шелухин, студенты НИ ТПУ

Научный руководитель Н.В. Ливенцова, доцент ОЯТЦ, ИЯТШ

г. Томск, НИ ТПУ, vvn24@tpu.ru

Робот-чертежник – проект портативной машины, в которой используется гелиевая ручка в качестве пишущего элемента для рисования (черчения) изображений (чертежей) различных форматов на бумагу.

Ключевые слова: плоттер, черчение, робототехника, Arduino, Matlab, CNC, Arduino IO.

Существуют различные типы и виды устройств, предназначенных для печати документов, рисунков, чертежей на бумагу, имитирования рукописных текстов. Целью работы послужило создание машины, создающей эскиз (рисунок) чертежа, используя файлы JPEG, PNG, DWG, CDW конвертированные в G-codes посредством специализированных программ.

В качестве вычислительной платформы была использована Arduino Uno, для управления двумя шаговыми двигателями типа NEMA 17 модели BERGER RDM 253/50, которые перемещают пишущую головку, использован CNC Shield v3.0.

Для создания отверстий с точностью до 0,1 мм изготовлен фрезерный станок из ДСП, тисков, дрели, стойки для дрели, координатного стола (рис. 1).





Рис. 1. Самодельный фрезерный станок и готовый робот-чертежник

Для данного устройства был реализован алгоритм на основе теории графов для поиска границ, а также следующей точки. В процессе происходит проверка наличия рядом пикселей с единицей, после этого ручка перемещается на следующий пиксель с единицей, а предыдущий удаляет. На втором этапе происходит решение обратной задачи кинематики, учитываются координаты пикселей и на основе этих данных выбираются углы поворота двигателя. Для написания использовались язык Matlab и его специальный плагин Arduino IO (рис. 2).

В результате работы было создано изделие, способное чертить чертежи, делать рисунки при помощи стандартных пишущих принадлежностей, выполняя функции плоттера. Данный проект был разработан для студентов, может использоваться при выполнении заданий по начертательной геометрии, теории механизмов и машин, для произ-

водств при создании чертежей на бумаге, для изготовления открыток, имитируя рукописный текст, ручные рисунки.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы устройства

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафарянц Д.С., Софиев А.Э. Визуализация генетической сети в рамках программы «Passportgen» // Изв. Моск. гос. техн. ун-та МАМИ. – 2013. – Т. 2, № 3 (17).

2. Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1968. – 368 с.

УДК 372.862

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А.А. Изюмов, ассистент; А.Е. Винник, студент;
Н.Ю. Хабибулина, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, hnu@mail.ru

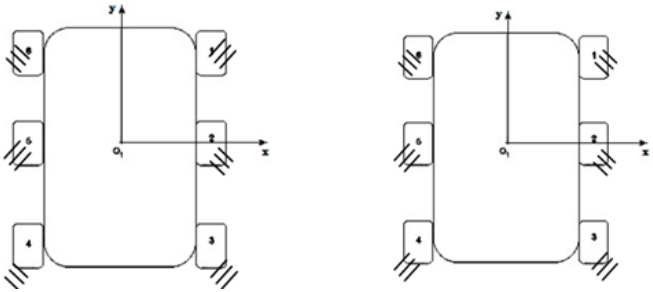
Проверена гипотеза о моделировании траектории движения мобильного робота, описываемой методом кубического сплайна.
Ключевые слова: мобильные роботы, моделирование движения.

Современные мобильные роботы способны выполнять не только команды, поступающие от оператора, но и самостоятельно планировать траекторию достижения конечного пункта назначения, огибая препятствия. Для решения задачи прогнозирования траектории предположим, что известны точки, через которые должен проехать робот. На основе данного предположения будем прогнозировать траекторию движения робота, используя методы приближения (аппроксимации) данных.

Термин «динамическое планирование» чаще всего используют в робототехнике для декомпозиции задачи сложного движения робота на несколько задач простого движения, которые удовлетворяют ограничениям движения и по возможности оптимизируют некоторые аспекты движения [1].

В эксперименте по моделированию движения рассматривается модель шестиколесного меканум-робота, колеса которого расположены в два ряда вдоль стороны прямоугольного корпуса, при этом возможно два положения колес (рис. 1).

При проведении эксперимента прогнозирование траектории происходит методом кубического сплайна, коэффициенты которого находятся при явном решении задачи управления.



а *б*

Рис. 1. Модель робота с меканум-колесами

Результаты прогнозирования и реальная траектория движения робота приведены на рис. 2, 3.

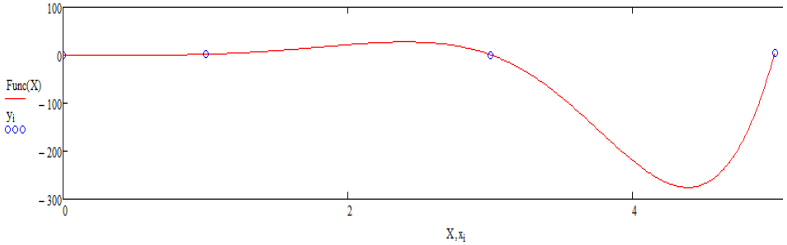


Рис. 2. Траектория, полученная в исходном эксперименте

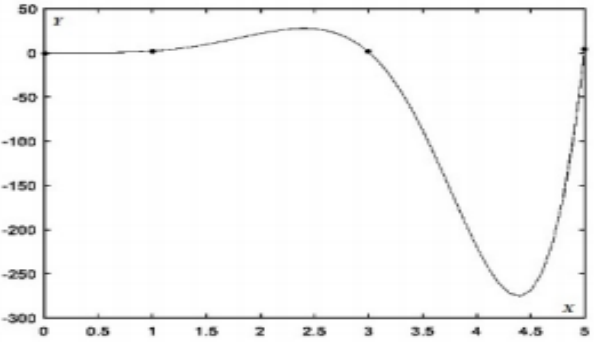


Рис. 3. Траектория, полученная в результате воспроизведения эксперимента

Рассмотрим пример с 4 заданными точками: (x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3). Точки соединены тремя сплайн-кривыми:

$$y = \begin{cases} y_1 = c_{14}x^4 + c_{13}x^3 + c_{12}x^2 + c_{11}x + c_{10}, & x_0 \le x < x_1; \\ y_2 = c_{24}x^4 + c_{23}x^3 + c_{22}x^2 + c_{21}x + c_{20}, & x_1 \le x < x_2; \\ y_3 = c_{34}x^4 + c_{33}x^3 + c_{32}x^2 + c_{31}x + c_{30}, & x_2 \le x < x_2. \end{cases}$$

Для достижения более гладкой траектории потребуем выполнения следующих условий:

$$y_1(x_0) = y_0,\ \ y_1(x_1) = y_1,\ \ y'_1(x_0) = 0,\ \ y''_1(x_0) = 0,\ \ y'''_1(x_0) = 0,$$
$$y'_1(x_1) = y'_2(x_1),\ \ y''_1(x_1) = y''_2(x_1),\ \ y'''_1(x_1) = y'''_2(x_1),\ \ y_2(x_1) = y_1,\ \ y_2(x_2) = y_2,$$
$$y'_2(x_2) = y'_3(x_2),\ \ y''_2(x_2) = y''_3(x_2),\ \ y'''_2(x_2) = y'''_3(x_2),\ \ y_3(x_2) = y_3,\ \ y_3(x_3) = y_3.$$

Все вышеперечисленные условия задают систему уравнений на полиномиальные коэффициенты c_{ij}. С учетом накладываемых на модель условий систему, описывающую траекторию движения, можно записать в виде

$$A \cdot c = B,$$

где $c = (c_{14}\ c_{13}\ c_{12}\ c_{11}\ c_{10}\ c_{24}\ c_{23}\ c_{22}\ c_{21}\ c_{20}\ c_{34}\ c_{33}\ c_{32}\ c_{31}\ c_{30})^T$;

$$B = (y_0\ y_1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ y_1\ y_2\ 0\ 0\ 0\ y_2\ y_3)^T;$$

$$A =$$

$$= \begin{pmatrix}
x_0^4 & x_0^3 & x_0^2 & x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_0^3 & 3x_0^2 & 2x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_0^2 & 6x_0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4x_1^3 & 3x_1^2 & 2x_1 & 1 & 0 & -4x_1^3 & -3x_1^2 & -2x_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
12x_1^2 & 6x_1 & 2 & 0 & 0 & -12x_1^2 & -6x_1 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
24x_1 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_1 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4x_2^3 & 3x_2^2 & 2x_2 & 1 & 0 & -4x_2^3 & -3x_2^2 & -2x_2 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12x_2^2 & 6x_2 & 2 & 0 & 0 & -12x_2^2 & -6x_2 & -2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 24x_2 & 6 & 0 & 0 & 0 & -24x_2 & -6 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_3^4 & x_3^3 & x_3^2 & x_3 & 1
\end{pmatrix}.$$

После нахождения решения $c = A^{-1} \cdot B$ и подстановки полученных коэффициентов в уравнение кубического сплайна получим траекторию движения робота. Результат решения данной системы приведен ниже:

$$c_{ij} = \left(2, 0, 0, 0, 0, -\frac{129}{16}, \frac{161}{4}, \frac{483}{8}, \frac{161}{4}, \frac{601}{8}, -958, \frac{17727}{4}, -8944, \frac{53825}{8}\right)^T.$$

Как можно заметить, исходная траектория и траектория, полученная при повторе эксперимента, являются схожими. Это свидетельствует о том, воссозданная система прогнозирует траекторию верно.

ЛИТЕРАТУРА

1. LaValle S.M. Planning algorithms. – Cambridge University Press, 2016. – P. 1–512.

УДК 004.932.4

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО РОБОТА

Д.Ю. Журавлев, студент каф. УИ

Научный руководитель А.А. Зоркальцев, аспирант каф. УИ

г. Томск, ТУСУР, aleksandr.a.zorkaltsev@tusur.ru

Обсуждаются задачи выбора методов кодирования видеоинформации для мобильного диагностического робота, выбор оптимальных метрик качества, выбор оптимальных настроек для заданных камер.

Ключевые слова: среда MSU VQMT 12, opencv, система, метрика, видеопоток, кодек, h.264, ffmpeg, numpy, битрейт.

Всем знакомо понятие качества дорог, и многих этот вопрос особенно беспокоит. На встрече с представителями государственной компании «Автодор» «ЭлеСи» совместно с госкорпорацией «Ростом» презентовала новейшую разработку, которая не имеет аналогов в России и во всем мире. «Кондор» – многоканальный сканер качества дорожного покрытия, который работает в динамическом режиме. В данной работе объектом исследования является видеоподсистема данной установки. Однако при передаче большого объема данных требуется много места для хранения информации, а также высокая скорость передачи данных. Для уменьшения хранимой информации применяются методы сжатия, но при неоптимальном сжатии мы можем получить потерю качества данных. Задачами работы являются выбор методов кодирования видеоинформации для мобильного диагностического робота, изучение технологий, необходимых для реализации улучшения качества, выбор оптимальных метрик качества, выбор оптимальных настроек для заданных камер.

В качестве метода кодирования информации будет применяться кодек h.264.

H.264 представляет собой огромный шаг вперёд в технологии сжатия видеоизображения [1]. Этот стандарт предлагает различные технологии, позволяющие добиться лучшей эффективности сжатия благодаря применению более точных схем внутреннего предсказания, а также большей устойчивости к ошибкам [2].

На сегодняшний день одни из последних и наиболее точных метрик, имеющие низкую корреляцию с субъективными оценками, являются VQM и SSIM, которые мы и будем применять в данной работе [3].

Рассмотрим несколько профилей кодека h.264 на двух камерах при различной освещенности и различными значениями битрейта и запишем результаты [4].

Вначале посмотрим, на каком профиле кодека h.264 при наилучшем освещении мы получили самую малую величину ошибки по метрикам качества SSIM и PQM. Ошибки метрики PQM приведены в табл. 1. Данные ошибок метрики SSIM приведены в табл. 2.

Мы можем видеть, что наименьшую ошибку на двух камерах по метрике VQM мы получаем при применении main профиля кодека h.264, а по метрике SSIM также и при применении high профиля. Исходя из результатов двух метрик выбираем профиль main и метрику VQM, как более точную, для дальнейшего исследования. Далее определим, при каком освещении профиля main мы можем получить лучшее качество при лучшем сжатии информации и меньшем объеме.

Мы можем увидеть наименьшую величину ошибки, не превышающую допустимый порог, с минимальным размером файла в случае

первой и второй камеры при применении main профиля кодека при освещенности 95% и при четырехкратном уменьшении исходного битрейта видеопотока.

Таблица 1

Ошибки метрики PQM

	Main профиль 1 камеры	High профиль 1 камеры	Baseline профиль 1 камеры	Main профиль 2 камеры	High профиль 2 камеры	Baseline профиль 2 камеры
VQM	0,0115	0,0123	0,0109	0,0136	0,0147	0,0141
	0,0104	0,0128	0,0108	0,0132	0,0147	0,0146
	0,011	0,0137	0,0112	0,0231	0,0229	0,0267
	0,0106	0,0126	0,0106	0,0547	0,0519	0,0597
	0,0365	0,0421	0,0404	0,1045	0,1	0,1206
	0,0897	0,1037	0,0986	0,2564	0,2557	0,3197
	0,1238	0,1216	0,1179	0,3947	0,3733	0,5031

Таблица 2

Ошибки метрики SSIM

	Main профиль 1 камеры	High профиль 1 камеры	Baseline профиль 1 камеры	Main профиль 2 камеры	High профиль 2 камеры	Baseline профиль 2 камеры
SSIM	0,9999	0,9999	0,999	0,9999	0,9999	0,999
	0,9999	0,9999	0,999	0,9999	0,9999	0,999
	0,9999	0,9999	0,999	0,9998	0,9998	0,9989
	0,9999	0,9999	0,999	0,9992	0,9992	0,9991
	0,9997	0,9996	0,995	0,9979	0,998	0,9979
	0,9987	0,9987	0,998	0,9964	0,9964	0,9959
	0,9981	0,9981	0,9983	0,9947	0,9958	0,9947

В результате работы произведен обзор оптимальных метрик качества видеоинформации, проведен выбор оптимальных настроек для выбранной камеры.

По результатам использования методов оценки качества видеоинформации было выявлено, что некоторые методы не применимы из-за их неточности в рамках данной работы. Выбраны оптимальные метрики оценки качества видеоинформации, а также программное обеспечение, поддерживающее данные методы.

Выбранные настройки кодека для камеры позволят сократить количество выделяемой памяти на устройстве с минимальной потерей качества видеопотока.

Полученные знания необходимы для дальнейшего улучшения и модернизации системы, в частности, для доработки софта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Что такое стандарт сжатия h.264 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://video-rec.ru/helpful-information/cctv/standard-compression-codec-h-264/, свободный (дата обращения: 21.11.2019).

2. Трансляция h.264 видео без перекодирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/post/415567/, свободный (дата обращения: 23.11.2019).

3. Метрики для оценки качества восстановленного изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sibac.info/studconf/science/xxxvi/94727, свободный (дата обращения: 02.12.2019).

4. MSU QMT: Metrics information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.compression.ru/video/quality_measure/info.html#3ssim, свободный (дата обращения: 11.11.2019).

ПОДСЕКЦИЯ 1.7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

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

УДК 621.375.4

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТКА СВЧ-ИНТЕГРАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА DC – 4 ГГц НА ОСНОВЕ 0,5 мкм GaAs-EpHEMT-ТЕХНОЛОГИИ

А.А. Метель, лаборант; И.М. Добуш, с.н.с., к.т.н.;
А.С. Сальников, зав. лаб., к.т.н.; А.А. Калентьев, с.н.с., к.т.н.
г. Томск, Лаборатория «50ohm Lab», ТУСУР,
aleksandr.metel@50ohm.tech

Представлены обзор используемых схемотехнических решений и результаты разработки СВЧ МИС усилителя диапазона DC – 4 ГГц на основе 0,5 мкм GaAs-EpHEMT-технологии.
Ключевые слова: СВЧ, монолитная интегральная схема, усилитель, GaAs, E-mode, pHEMT.

Сверхширокополосные усилители диапазона частот DC – 4 ГГц получили широкое распространение при построении каскадов предварительного усиления в приемопередающих модулях и усилителях мощности, активных преобразователях частоты, измерительном оборудовании.

Рассматриваемые усилители изготавливаются на основе BJT, HBT, MESFET и HEMT-транзисторов по SiGe-, InGaP-, GaAs- и GaN-технологиям. HBT-транзисторы обладают высоким коэффициентом усиления и динамическими характеристиками до 2 ГГц, однако на более высоких частотах уступают HEMT-транзисторам [1]. Ключевым преимуществом BJT- и HBT-транзисторов является возможность использования одного источника питания с положительной полярностью. Использование нормально открытых, иначе D-mode, MESFET- и HEMT-транзисторов в таком усилителе влечет за собой увеличение габаритов устройства и усложнение схемотехнического решения

вследствие необходимости использования дополнительного источника питания с отрицательной полярностью [2]. При использовании нормально закрытых, иначе E-mode, HEMT-транзисторов необходимость в использовании отрицательного источника отсутствует.

В таблице приведены основные характеристики некоторых из существующих усилителей на основе GaAs-EpHEMT.

Характеристики имеющихся усилителей

	Δf, ГГц	$\lvert S_{21}\rvert$, дБ $\lvert S_{12}\rvert$, дБ	$\lvert S_{11}\rvert$, дБ $\lvert S_{22}\rvert$, дБ	NF, дБ $P_{\text{вых 1 дБ}}$, дБм	$U_{\text{П}}$, В $I_{\text{П}}$, мА	Примечание
3	DC-4	8÷26 –12,5	–10 –14	1,3 22÷24	3 58	Активное питание
4	DC-4	13÷15 –18	–14 –12	3 17÷21	5 85	0,5 мкм, каскод, активное питание, ESD
5	DC-2,6	15,3 –21	–12 –15	2,3 19÷21	5 65	0,25 мкм
6	DC-16	10÷12 –	–15 –12	6 8÷18	5 55	0,5 мкм, Дарлингтон, каскод, активное питание
7	DC-3	9÷24 –13	–9,5 –17,3	0,8 17÷19	3 56	0,25 мкм, ESD

Анализируя используемые схемотехнические решения, в качестве основных выделены следующие: одиночный транзистор, включенный по схеме с общим истоком; каскод; усилитель Дарлингтона; комбинация усилителя Дарлингтона с каскодным включением.

Основными достоинствами схемы включения одиночного транзистора являются малые габариты и коэффициент шума усилителя, однако для такого решения характерны сильная неравномерность коэффициента усиления, малый уровень коэффициента обратной передачи [2]. Включение транзистора типа каскод или Дарлингтон увеличивает развязку, однако ухудшает шумовые характеристики [3, 4], комбинация данных решений позволяет повысить равномерность динамических характеристик в широкой полосе частот [5].

Разработка МИС усилителя. На основе выполненного анализа выбрано схемотехническое решение – включение одиночного транзистора по схеме с общим истоком. Это решение позволило минимизировать коэффициент шума и увеличить КПД в разработанной МИС усилителя. В усилителе предусмотрено активное питание для температурной стабилизации по току в рабочем диапазоне температур от минус 60 до 85 ºС. В качестве активного элемента использовался GaAs- EpHEMT-транзистор с периферией затвора 1 мм. Напряжение питания 3,5 В, ток потребления составил 80 мА. На рис. 1 представле-

ны структурная схема усилителя и результаты моделирования основных СВЧ-характеристик усилителя диапазона частот DC – 4 ГГц. Габариты кристалла составили 0,54 мм^2.

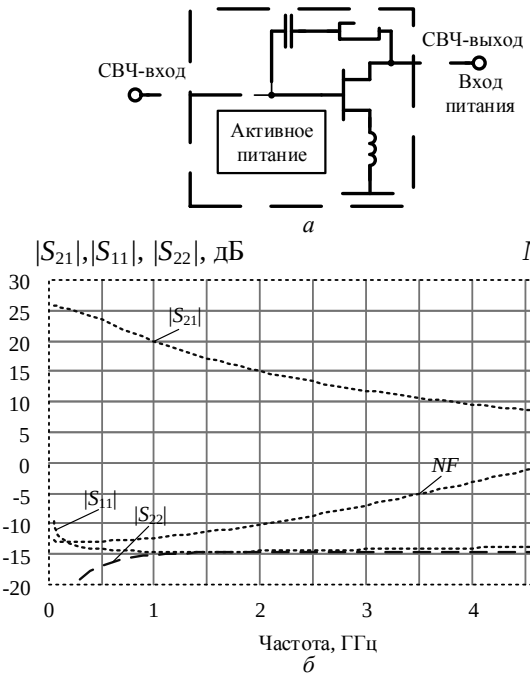


Рис. 1. Структурная схема усилителя (*а)*
и результаты моделирования основных СВЧ-характеристик (*б*)

Заключение. Выполнен обзор и анализ используемых схемотехнических решений. Разработана МИС усилителя диапазона частот DC – 4 ГГц, напряжение питания схемы 3,5 В, ток потребления 80 мА, предусмотрена цепь активного питания. Коэффициент усиления составил 9÷25 дБ, коэффициенты отражения по входу и выходу не более –12 дБ, коэффициент шума не более 1,7 дБ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-2623.2019.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kobayashi K.W. High linearity-wideband PHEMT Darlington amplifier with +40 dBm IP3 // Asia-Pacific Microwave Conference. – 2006. – P. 1035–1038.

2. Kobayashi K.W. Improved efficiency, IP3-Bandwidth and Robustness of a Microwave Darlington Amplifier using 0.5um ED PHEMT and a New Circuit Topology // IEEE CSIC Digest. – 2005. – P. 93–96.

3. Qorvo SPF5122Z, Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.qorvo.com/products/d/da001904 (дата обращения: 21.02.2020).

4. Triquint TGA4928, Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.planetec.com/product/datasheet/TGA4928.pdf (дата обращения: 21.02.2020).

5. Avago MGA-30889, Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.west-l.ru/uploads/tdpdf/mga-30889_eng_tds.pdf (дата обращения: 21.02.2020).

6. Kobayashi K.W. Linearized Darlington Cascode Amplifier Employing GaAs-pHEMT and GaN-HEMT-Technology // IEEE Journal of Solid-state Circuit. – 2007. – P. 2116–2122.

7. Mini-Circuits PMA2-33LN+, Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.minicircuits.com/pdfs/PMA2-33LN+.pdf (дата обращения: 21.02.2020).

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Я.Ю. Малькова, студентка; Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ, к.т.н.; А.А. Суворов, ассистент ОЭЭ ИШЭ, к.т.н.

г. Томск, ТПУ, yamalkova96@gmail.com

Отражено влияние мощности и удаленности от источника питания объекта распределенной генерации на величину токов короткого замыкания на примере моделирования схемы в программном комплексе MATLAB/Simulink. При проектировании объектов на основе возобновляемых источников энергии учитены влияние режима работы возводимого объекта генерации на работу электроэнергетической системы, а именно, изменение величины и направления потоков мощности, уровней напряжения в узлах сети, величины токов короткого замыкания, а также возможность локальной установки вблизи конечного потребителя.

Ключевые слова: распределенная генерация, токи КЗ, влияние, электроэнергетическая система, релейная защита.

В настоящее время возобновляемая генерация играет важную роль в мировой электроэнергетической отрасли. Так, прирост ввода объектов на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в 2018 г. в сравнении с 2017 г. составил 15%, а именно 1,246 и 1,081 ГВт

соответственно [1]. Растущий интерес к данному типу генерации обусловлен, во-первых, относительно небольшой мощностью 5 кВт – 100 МВт (в основном до 10 МВт и меньше), что позволяет устанавливать объекты ВИЭ в непосредственной близости от конечного потребителя. Во-вторых, в условиях роста негативного влияния на экологическую обстановку и конечности запасов углеводородных ресурсов ввод объектов ВИЭ позволяет снизить критичность данных факторов для мировой электроэнергетики. Кроме того, с каждым годом повышается экономическая эффективность возобновляемой генерации, стоимость электроэнергии снижается, приближаясь к стоимости традиционной генерации [2].

Внедрение объектов ВИЭ в электроэнергетическую сеть (ЭЭС) оказывает значительное влияние на режим работы ЭЭС, приводит к изменению перетоков мощности, уровней напряжения в узлах, в частности, в местах присоединения конечных потребителей, а также к изменению величины токов короткого замыкания (КЗ). Кроме того, приводит к повышению надежности электроснабжения потребителей.

Согласно прогнозу [3], доля объектов ВИЭ в мировой электроэнергетике к 2040 г. должна составить порядка 20% от суммарной установленной мощности всех типов генерации. Столь масштабное внедрение возобновляемой генерации в ЭЭС влечет за собой ряд проблем технического характера. Рассмотрим некоторые из них. Во-первых, планирование ЭЭС. Современные ЭЭС характеризуются большим числом узлов нагрузки и соответственно возможных мест размещения распределенной генерации (РГ), к которой относятся объекты ВИЭ.

Одной из задач современных исследований является определение оптимальной конфигурации ЭЭС (реконфигурация сети), оптимального места установки РГ и ее мощности, а также согласование режимов работы ЭЭС и РГ. Решение данной задачи возможно посредством применения оптимизационных алгоритмов (численный, аналитический, эвристический), которые, в свою очередь, осуществляют расчет целевой функции. Величина последней определяет наиболее оптимальное распределение потоков мощности в сети. Параметрами целевой функции выступают: потери активной и реактивной мощности, относительный уровень напряжения в узлах и др. Так, минимальное значение целевой функции возможно достичь снижением потерь мощности и повышением уровня напряжения в узлах ЭЭС. Во-вторых, учет потерь и перетоков мощности. Для радиальной ЭЭС с односторонним питанием характерно однонаправленное распределение генерируемой мощности – от генератора к потребителям.

Внедрение РГ в ЭЭС влечет за собой изменения в распределении потоков мощности в ЭЭС: РГ устанавливается локально, обеспечивая покрытие определенной части нагрузки, тем самым уменьшая потребление электроэнергии от сети (количество мощности и расстояние, на которое она передается [4]), а соответственно и потери мощности, при выборе оптимального размера РГ, в частности, не превышающего мощности нагрузки в узле размещения и не вызывающего обратного перетока мощности от РГ в ЭЭС. Исследуем влияние РГ на величину токов КЗ на примере моделирования схемы (рис. 1) в программном комплексе MATLAB/Simulink.

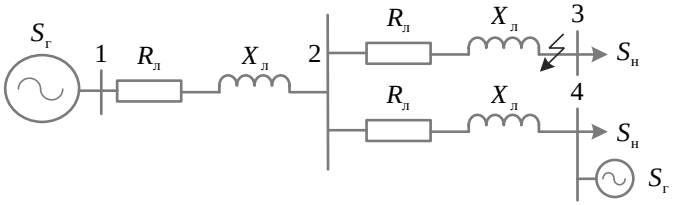


Рис. 1. Исследуемая схема

На основании результатов (рис. 2), можно заключить, что с увеличением мощности КЗ РГ увеличивается значение тока КЗ. С увеличением протяженности линии 2–4 уменьшается значение тока КЗ, для данного опыта мощность КЗ РГ принята 1000 кВА.

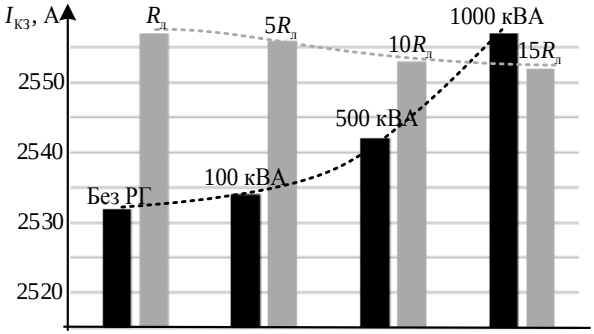


Рис. 2. График зависимости величины тока КЗ от мощности РГ и длины линии

Таким образом, при внедрении РГ в ЭЭС следует учитывать ее влияние на величину и направление тока КЗ, что определяет необходимость пересчета уставок релейной защиты, обновления коммутационного оборудования, а также применения в распределительных сетях

более сложной защиты, учитывающей и величину тока КЗ, и его направление.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (№ 18-79-10006) «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации».

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание «Наука» № FSWW-2020-0017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Renewables 2019 Global Status Report. REN21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (дата обращения: 08.03.2020).

2. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: Definition, benefits and issues // Energy Policy. – 2005. – Vol. 33, No. 6. – P. 787–798.

3. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина; ИНЭИ РАН. – Моск. школа управления СКОЛКОВО. – 2019. – С. 13 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (дата обращения: 08.03.2020).

4. Singh R.K., Goswami S.K. Optimum allocation of distributed generations based on nodal pricing for profit, loss reduction, and voltage improvement including voltage rise issue // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2010. – Vol. 32, No. 6. – P. 637–644.

СЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – **Еханин С.Г.**, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент;*
*зам. председателя – **Романовский М.Н.**, доцент каф. КУДР, к.т.н.*

УДК 53.097

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (ВАХ) СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Н.К. Афанасьев, магистрант;
А.С. Степанова, А.В. Кинах, студенты
Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф-м.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, gemma@main.tusur.ru

Для оценки качества и надежности сверхъярких светоизлучающих диодов (СИД) показана необходимость определения их последовательного и параллельного паразитных сопротивлений. Величины паразитных сопротивлений оцениваются с помощью метода нахождения критических точек ВАХ. Показаны результаты ранжирования СИД по их качеству.
Ключевые слова: паразитные сопротивления светодиодов, вольт-амперные характеристики.

Светодиодное освещение стало альтернативой традиционным лампам накаливания благодаря низкому энергопотреблению и долговечности. Тем не менее проблема увеличения долговечности остается актуальной. Сверхъяркий светоизлучающий диод (СИД) кроме обычного *p*–*n*-перехода имеет встроенную в него наногетероструктуру, которая позволяет получить внутренний квантовый выход, близкий к 100%. Начальная планарная неоднородность инжекции носителей заряда в InGaN-квантовые ямы до и после оптической деградации свя-

зывается с диффузией и электромиграцией ионов металла и остаточной примеси вдоль дефектных трубок, индуцированной механическими напряжениями [1, 2]. Это приводит к возрастанию токов утечки и дальнейшей катастрофической деградации структуры.

Процессы деградации можно контролировать по изменениям ВАХ [2, 3]. С научной и практической точек зрения вызывает интерес проведение таких же исследований для СИД, изготовленных по flip-chip технологии.

Традиционная схема монтажа предполагает размещение СИД кристалла вверх контактными электродами. В роли токоведущих контактов используются ультратонкие золотые нити с очень качественной и точной пайкой. При монтаже кристаллов всегда необходимо учитывать такой фактор, как качество отвода тепла в кристалле. Для того чтобы повысить интенсивность отвода тепла от активной зоны, была предложена новая технология flip-chip (перевернутый чип). При такой конструкции ожидается лучший отвод тепла, а значит, и повышение надежности СИД.

В данной работе исследуется недавно обнаруженный эффект «токовых нестабильностей» в СИД, конструкции flip-chip.

Экспериментальная часть. Вольт-амперная характеристика СИД измерялась с помощью прецизионного измерителя фирмы «Keysigth» модели B2902A.

В качестве образцов для исследования применялись flip-chip светодиоды средней мощности без люминофора, установленные на подложке-радиаторе, изготовленной по алюмооксидной технологии. Образцы светодиодов представлены АО НИИПП.

Измерение ВАХ проводилось при прямом напряжении в диапазоне 0–3,0 В и при обратном напряжении в диапазоне 0–(–3,0 В) (рис. 1).

На рис. 1 представлены прямые ВАХ в полулогарифмическом масштабе следующих образцов: 171.6, 171.7, 171.8, 172.5, 172.6, 172.7, 172.8.

Известно [3], что СИД обладают нежелательными, или паразитными, сопротивлениями. Последовательные сопротивления могут проявляться из-за слишком большого сопротивления контактов или сопротивления нейтральной области. Любые проводящие каналы в активной зоне, вызванные разрушением ее областей или наличием дефектов, приводят к формированию паразитных параллельных сопротивлений. Величину последовательного сопротивления можно оценить при высоких напряжениях на СИД (при больших токах). Величину параллельного сопротивления можно найти при малых токах (в начале координат ВАХ).

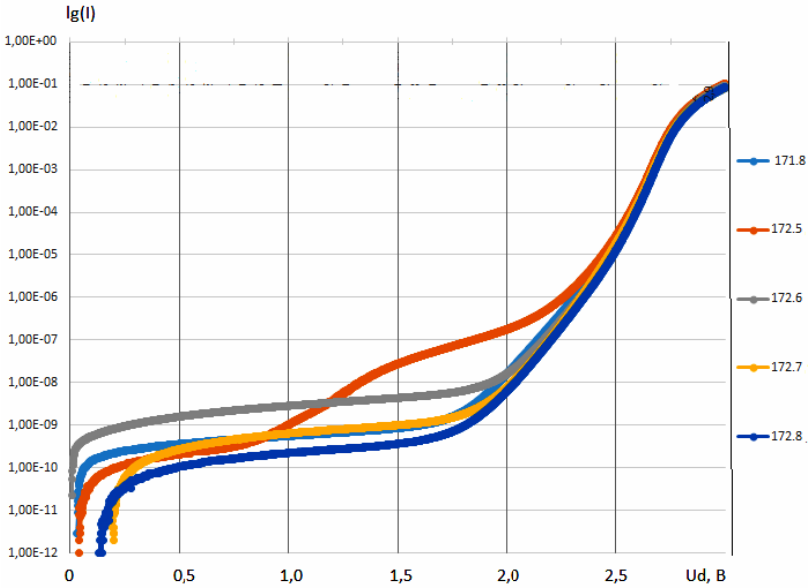


Рис. 1. Прямые ВАХ образцов СИД

Критические точки позволяют оценить величины паразитных сопротивлений, а значит, в конечном итоге качество и надежность СИД. Величина U_1 определяется при токе через СИД, равном 100 мА, величина U_2 – при токе через СИД, равном 1 мкА, величина тока насыщения определяется по обратной ВАХ при напряжении –3 В. В таблице приведены величины критических точек ВАХ для ряда СИД (см. рис. 1), расположенные в порядке ухудшения качества и надежности.

Результаты оценки критических параметров СИД

U_1, В	Номер светодиода	U_2, В	Номер светодиода	I_s, нА	Номер светодиода
2,8	172,5	2,23	171,7	1,62	172,5
2,81	172,6	2,22	171,6	3,87	172,6
2,83	171,8	2,17	172,8	0,244	172,8
2,83	172,7	2,16	172,7	0,314	171,7
2,83	172,8	2,16	172,6	0,348	171,6
2,84	171,7	2,13	171,8	0,554	171,8
2,84	171,6	2,11	172,5	0,585	172,7

Таким образом, используя критические точки ВАХ СИД, можно осуществлять отбраковку некачественных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарева Н.И. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация синих светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, вып. 1. – С. 122–127.

2. Еханин С.Г., Томашевич А.А., Афанасьев Н.К. Комплексное исследование процесса дефектообразования в кристаллах GaN-светодиодов средней мощности при длительных испытаниях // Электронные средства и системы управления: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2018. – Т. 1. – С. 94–97.

3. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

УДК 612.8, 53.087

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО РАДИОИЗОТОПНОГО МЕТОДА В ОЦЕНКЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

К.Е. Макарова, П.А. Надеев, студенты

Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, stalker@main.tusur.ru

Приведено описание методики и экспериментов по измерению радиоактивного излучения от испытуемого в состоянии работы за компьютером, при физической нагрузке, при прослушивании музыкальных композиций и др. Показано, что интегральное излучение от испытуемого и кривая статистического распределения существенно изменяются.

Ключевые слова: стресс, диагностика, пассивный радиоизотопный метод, статистические распределения.

В настоящее время существуют следующие методы в диагностике хронического стресса: измерение физиологических характеристик (изменение частоты пульса и т.д.); методы, измеряющие особые участки мозга; методы, которые производят спектральный анализ звуковых волн голоса; методы, анализирующие состав эндокринных веществ, определяющие индикаторы иммунных механизмов, биохимические индикаторы стресса, генетические маркеры хронического стресса и т.д. [1]. Все вышеперечисленные методы или инвазивные, или требуют подсоединения к человеку большого количества контактов, проведения дорогостоящих биохимических анализов, кроме того, на их проведение требуются временные затраты. Поэтому бесконтактные методы, позволяющие диагностировать стрессовое состояние человека в режиме онлайн, являются актуальными. Используемый нами пассивный радиоизотопный метод [2] в отличие от применяемых активных радиоизотопных методов не требует введения в орга-

низм человека (дополнительно) радиоактивных веществ. Организм человека сам обладает некоторым количеством радиоактивных веществ. В частности, в крови содержится радиоактивный изотоп калия ^{40}K.

Эксперименты по измерению гамма-излучения от человека, проведенные в СКБ «Сталкер» ТУСУР [2], свидетельствуют о наличии взаимосвязи между активностью мозга и интенсивностью и изменении характеристик статистического распределения его радиоактивного излучения, что позволяет использовать этот метод для осуществления диагностики состояний стресса. Как выяснилось в дальнейшем, солнечная активность, проявляющаяся во взаимодействии протонного солнечного ветра с атмосферой и изменяющая поток атмосферных гамма-квантов [3], является основным мешающим фактором для выделения полезного сигнала, поэтому в данной работе использовался, как и в [3], аналитический метод выделения полезного сигнала.

В качестве датчика радиоактивного излучения использовался дозиметр MyGeiger DIY Kit Geiger Counter Kit PRO (третья версия), предназначенный для измерения мощности дозы гамма-излучения и для точного подсчета средних CPS. В данном приборе имеется возможность записи данных на карту памяти.

Эксперимент продолжался 2 ч. В течение первого часа измерялось фоновое излучение организма испытуемого, когда он занимался привычным трудом – работой за компьютером. Во время второго часа испытуемый через каждые двадцать минут выполнял физическую нагрузку – бегал по лестнице вверх-вниз в течение одной минуты. После одного такого подхода он садился и пытался расслабиться. Всё это время устройство находилось прикрепленным к верхней части его тела и фиксировало радиоактивное излучение.

На рис. 1 приведены результаты измерений излучения во время работы за компьютером (первый час) и излучения во время выполнения физической нагрузки (второй час).

Из рис. 1 видно, что кривая статистического распределения результатов измерений при выполнении физической нагрузки принимает более симметричный вид, чем кривая статистических распределений при работе за компьютером. Кроме того, интегральное излучение уменьшается на 1332 частицы в час. Это объясняется тем, что при продолжительной умственной деятельности испытуемый начинает входить в предстрессовое состояние. А при выполнении физических упражнений внимание переключается, кровь от головы отливает к ногам и нижней части тела, и поэтому его состояние нормализуется.

Кроме физических нагрузок последовательно было проведено воздействие на испытуемого музыкой разных жанров (классическая,

поп- и рок-музыка), видеороликов (комедийных и ужасов). При таких воздействиях показания датчика радиоактивности статистически значимо изменялись.

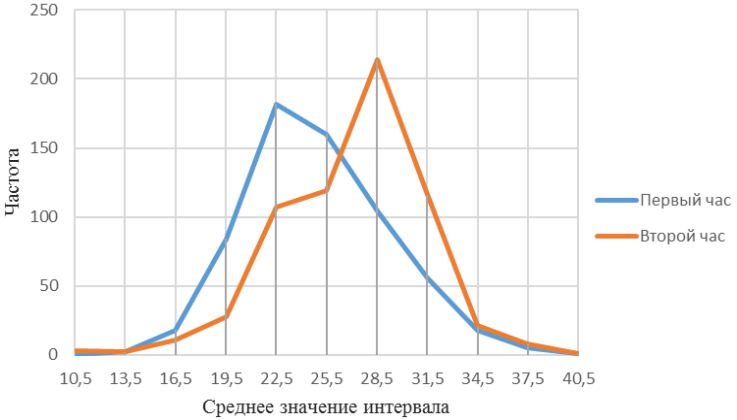


Рис. 1. Изменения статистических распределений результатов измерения во время работы за компьютером и во время выполнения физической нагрузки

Параллельно бесконтактным измерениям психофизиологического состояния проводились измерения кожно-гальванической реакции (КГР) испытуемого на электронной медицинской платформе MySignals [5].

Как показал сравнительный анализ, наблюдалась корреляция между изменениями показаний датчика радиоактивности и КГР. Причем относительное изменение показаний датчиков происходило синхронно и при воздействии физической нагрузки составляло примерно 15%.

Таким образом, применение пассивного радиоизотопного метода позволяет проводить бесконтактную оценку психофизиологического состояния человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иващенко О.И. Перспективы использования метода биологической обратной связи в нейротерапии хронических заболеваний // Науч.-практ. конф. «Опыт лечения и диагностика». – М., 2001.

2. Молошников В.А., Еханин С.Г., Ярымова И.А. Бесконтактный датчик для систем биологической обратной связи // Приборы и средства автоматизации. – 2008. – №12. – С. 11–17.

3. Коленко А., Шарабудинов Р., Елистратова Т. Аналитический метод выделения полезного сигнала для биологической обратной связи // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. – С. 19–22.

4. MyGeiger DIY Kit Geiger Counter Kit PRO ver. 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rhelectronics.net/store/mygeiger-3-pro-diy-dosimeter-ratemeter-radiometer-kit-with-lcd-usb.html (дата обращения: 29.02.20).
5. MySignals [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.libelium.com/downloads/documentation/mysignals_technical_guide.pdf (дата обращения: 18.02.2020).

УДК 615.478.6

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРИКРОВАТНОЙ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ГЕМОСТАЗА

Д.С. Слизевич, аспирант ИШХБМТ НИ ТПУ
Научный руководитель Ф.А. Губарев, доцент ИШХБМТ, к.ф-м.н.
г. Томск, НИ ТПУ, gfaddtpu@tpu.ru

Изложены основные этапы разработки аппаратно-программного комплекса для прикроватной оценки функционального состояния системы гемостаза в нативной крови. Предложена структурная схема комплекса, приведены основные решения в аппаратной и программной части. Обозначены дальнейшие работы по модернизации.
Ключевые слова: гемостаз, глобальный тест, аппаратно-программный комплекс.

В патогенезе практически любого заболевания системе гемостаза принадлежит ключевая роль, что делает оценку функционального состояния сосудисто-тромбоцитарного, коагуляционного и фибринолитического звеньев актуальной проблемой.

Особое место среди методов оценки функционального состояния системы гемостаза принадлежит глобальным тестам (ТЭГ, ТЭМ, НПТЭГ, ВСК) [1].

Целью работы явилась разработка аппаратно-программного комплекса для прикроватной оценки функционального состояния системы гемостаза в нативной крови.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи:

1. Разработка датчика, позволяющего оценить все этапы фибринообразования.
2. Разработка аппаратной части, отвечающей современным требованиям, предъявляемым к медицинскому оборудованию.
3. Разработка программной части, интуитивно понятной для медицинских специалистов.

На первом этапе работы была сформулирована структурная схема будущего аппаратно-программного комплекса.

Главным элементом разработанного устройства является пьезоэлектрический датчик, обеспечивающий необходимый уровень чувствительности для оценки всех звеньев системы гемостаза. Датчик регистрирует изменения сопротивления крови (в процессе свёртывания) резонансным колебаниям иглы-резонатора, закрепленной на пьезоэлектрическом элементе, который представляет собой латунную основу, покрытую пьезокерамическим слоем и разделенную на два полукруглых сегмента, а второй конец погружают в кювету с кровью пациента. Игла-резонатор изогнута посередине в виде петли.

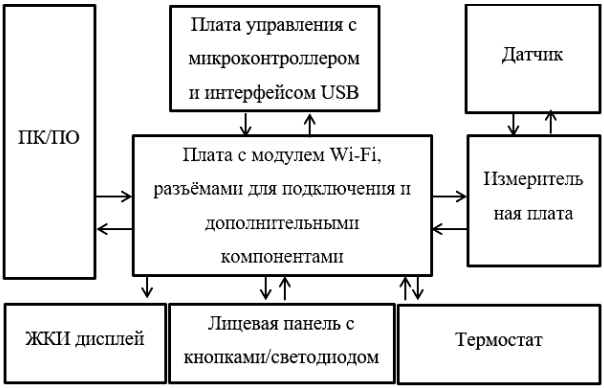


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Частота колебаний иглы-резонатора в воздухе и жидкости поддерживается одинаковой. Разница между амплитудами колебаний в воздухе и жидкости является полезным сигналом [2].

Ключевым элементом аппарата выступил цифровой микроконтроллер, управляемый программой, хранящейся в его энергонезависимой памяти (ПЗУ). Микроконтроллер имеет объём оперативной памяти (ОЗУ), достаточный для накопления и анализа данных в процессе работы, и энергонезависимую память для хранения полученных результатов (EPROM). Микроконтроллер обладает широким набором встроенных периферийных устройств для подключения необходимых аналоговых и цифровых устройств [3].

Для питания прибора был разработан отдельный узел, обеспечивающий стабильное выходное напряжение 5 В при изменении входного напряжения в пределах 8…16 В.

Для управления работой прибора (включения и отключения нагрева термостата, изменения заданной его температуры) к контрол-

леру подключены кнопки, а для индикации состояния на передней панели расположен светодиод.

Индикация показаний в процессе работы или вывод каких-либо значений и информации происходит на ЖК-дисплее.

Для связи с ПК предусмотрен отдельный узел, обеспечивающий на выходе прибора стандартный порт USB, через который кабелем прибор подключается к ПК. В приборе, кроме кабельного USB-соединения, установлен модуль Wi-Fi, таким образом, появилась возможность беспроводного обмена данными прибора и ПК.

Для управления термостатированием измеряемого образца в приборе присутствуют нагревательный элемент и цифровой датчик температуры.

Что касается непосредственно измерительной части – здесь главным элементом является микросхема цифрового DDS-генератора сигналов, управляемая командами от микроконтроллера по специальному интерфейсу. Данная микросхема генерирует синусоидальный сигнал в диапазоне +0,04…0,65 В с перестраиваемой частотой. Специально разработанная плата преобразования аналоговых сигналов усиливает его и преобразует из однополярного в двуполярный. Этот переменный сигнал подаётся на одну из половин пьезоэлемента датчика, и в зависимости от сопротивления среды, в которую погружена игла, соединённая с пьезоэлементом, снимаемый со второй половины пьезодатчика сигнал с определённым ослаблением вновь поступает на узел аналоговой обработки. Там опять происходит усиление снятого с датчика сигнала и преобразование его из двуполярного переменного в постоянное напряжение, амплитуда которого пропорциональна максимальной амплитуде исходного. Это постоянное напряжение измеряется АЦП микроконтроллера, в программе производится пересчёт значения напряжения с требуемыми коэффициентами для получения значений в нужном диапазоне.

Программное обеспечение было разработано на базе ПО ИКС-Гемо3 для НПТЭГ АРП-01М «Меднорд» (ФСР 2010/09767). Основные изменения коснулись настройки (калибровки прибора), изменения алгоритмов обмена данными с прибором, была реализована возможность связи с прибором посредством Wi-Fi, внедрена система поддержки принятия решений, которая должна существенно облегчить врачам-клиницистам постановку диагноза.

Разработанный аппаратно-программный комплекс для прикроватной оценки функционального состояния системы гемостаза в нативной крови отвечает современным трендам диагностической медицины, все рутинные этапы по настройке, калибровке были значитель-

но упрощены по сравнению с аналогами, система поддержки принятия решений должна позволить использовать комплекс медицинским персоналом, не имеющим высокой квалификации в области гемостаза. Дальнейшие работы направлены на повышение информативности теста, исключение сбоев в работе, создание более простого интуитивного интерфейса в программном обеспечении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилова Т.В. Как построить программу лабораторного обследования больного с нарушениями в свертывании крови // Атеротромбоз. – 2017. – № 2. – С. 95–108.

2. Демкин В.П., Мельничук С.В., Удут В.В. Физические принципы метода низкочастотной пьезотромбоэластографии для изучения реологических свойств цельной крови // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 6. – С. 47–56.

3. Пономаренко В.И., Караваев А.С. Использование платформы Arduino в измерениях и физическом эксперименте // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2014. – Т. 22, № 4. – С. 77–90.

ПОДСЕКЦИЯ 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Лощилов А.Г.**, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена», к.т.н.;*
*зам. председателя – **Бомбизов А.А.**, начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

УДК 620.179.118.4

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИРОВКИ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

Е.А. Иванчикова, А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова, магистранты каф. КУДР
Научные руководители: А.Г. Лощилов, зав. каф. КУДР, к.т.н., доцент; И.А. Екимова, доцент каф. КУДР, к.х.н.
г. Томск, ТУСУР, 88k5a08@mail.ru

Изучено изменение рельефа поверхности пластиковых изделий, изготовленных методом FDM-печати, в зависимости от времени полировки.
Ключевые слова: FDM-печать, полировка, шероховатость, пластик, металлизация.

Одной из отличительных особенностей пластмасс является способность образовывать и сохранять электростатические заряды, что приносит вред изделиям электронной техники – полупроводниковым приборам (ПП) и интегральным схемам (ИС) – электростатический заряд (ЭСЗ). Аккумуляция заряда на пластинах и фотошаблонах приводит к потерям в выходе годных ПП и ИС, так как заряженная поверхность подобно «пылемагниту» способна собирать частицы пыли. Анализ показывает, что до 65% отказов вызвано воздействием ЭСЗ. Восприимчивые к электростатическим зарядам ПП и ИС подвергаются опасности как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации [1]. Таким образом, необходимость снятия заряда неоспорима. Для решения данной задачи применяют металлизацию, осаждение токопроводящего слоя из металла на поверхность полимеров (пластмасс) с последующим гальваническим наращиванием [2]. Поверхность пластмассовых изделий после их изготовления не всегда пригодна для химической металлизации, и приходится изменять морфологическую

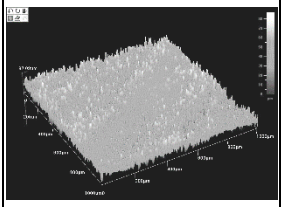
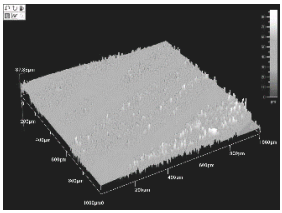
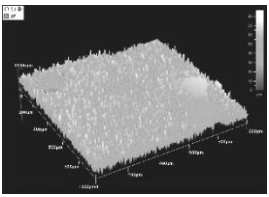
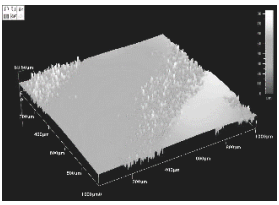
структуру и химический состав. В работе [3] был отработан один из способов решения вышеуказанной проблемы: метод химического меднения, являющийся наиболее популярным способом химических покрытий как поверхностной обработки материалов. Отличительной особенностью такого химического покрытия является высокая равномерность осаждения металла по всей поверхности диэлектрика.

Целью данной работы является отработка технологии полировки пластиковых изделий.

В качестве объектов исследования использовали подложки на основе ABS-пластика. Процесс полировки осуществляли путем погружения образца в раствор на основе дихлорэтана. Время выдержки при этом составляло 0, 15, 30, 60, 90 или 120 с. Профиль поверхности изучали с помощью профилометра MicroXAM-100.

Как видно из снимков рельефа (таблица), поверхность ABS-пластика после обработки в растворе дихлорэтана имеет различный характер. При этом наибольшей сплошностью и равномерностью обладают образцы, полученные при обработке в течение 90 с. Отмечено, что эти образцы имеют большее число центров кристаллизации, что позволяет сократить количество технологических операций для подготовки поверхности ABS-полимеров как к химической металлизации, так и для электрохимических методов осаждения металлов.

Изменение рельефа поверхности ABS-пластика в зависимости от времени полировки: 0, 30, 90 и 120 с

Профиль поверхности	Время выдержки, с	Профиль поверхности	Время выдержки, с
	0		30
	90		120

Для оценки изменения шероховатости в зависимости от времени полировки поверхности пластика было взято значение среднего отклонения от средней высоты для участка размером не более 300×300 мкм. На рис. 1 представлена зависимость шероховатости от режимов обработки.

Оценивать изменения однородности и равномерности рельефа поверхности в зависимости от режимов обработки поверхности пластика следует по значению среднеквадратичного отклонения (СКО) для участка размером не менее 1×1 мм (т.е. полного снимка), как показано на рис. 2.

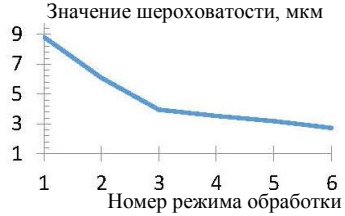


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности от режимов обработки ABS-пластика в дихлорэтане: *1* – 0 с; *2* – 15 с; *3* – 30 с; *4* – 60 с; *5* – 90 с; *6* – 120 с

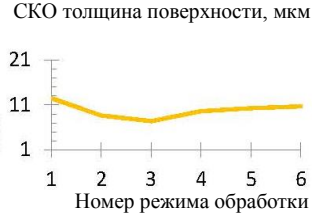


Рис. 2. Зависимость СКО толщины поверхности от режимов обработки ABS-пластика в дихлорэтане: *1* – 0 с; *2* – 15 с; *3* – 30 с; *4* – 60 с; *5* – 90 с; *6* – 120 с

Анализ всех полученных экспериментальных данных указывает на то, что в случае ABS-пластика наиболее оптимальным режимом обработки поверхности является выдержка в дихлорэтане в течение 90 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плюсы пластика как материала [Электронный ресурс]. –Режим доступа: http://www.kris-group.ru/articles/2013-11-01/405 (дата обращения: 28.02.2019).

2. Справочник химика 21 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://chem21.info/info/641735/ (дата обращения: 5.03.2019).

3. Влияние состава активирующих растворов на качество металлического покрытия АБС-пластика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sostava-aktiviruyuschih-rastvorov-na-kachestvo-metallicheskogo-pokrytiya-abs-plastika (дата обращения: 12.03.2019).

УДК 621.396.9

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УЗЛОВ ВХОДНОГО БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

М.А. Канина, студентка

Научный руководитель А.В. Филатов, проф. каф. КУДР

г. Томск, ТУСУР, marina_K1998@mail.ru

Рассмотрена модель измерителя величины модуля коэффициента отражения с использованием в схеме аттенюатора для исключения ослабления сигнала генератора шума. В результате моделирования определено влияние аттенюатора на точность измерений.

Ключевые слова: коэффициент отражения, микроволновая радиометрия, радиотермометрия.

В настоящее время радиотермометрия приобретает высокую популярность как метод диагностики онкологических заболеваний [1].

В работе [2] представлена схема измерения модуля коэффициента отражения. Но схема и модель, представленная в данной работе, не учитывают влияние, возникающее из-за сильного ослабления сигнала генератора шума, который распространяется в сторону антенны после направленного ответвителя.

Чтобы избавиться от данного недостатка, в схему рис. 1 вводится аттенюатор, который ослабляет сигнал генератора шума. В качестве зондирующего сигнала используется широкополосный шум низкой интенсивности.

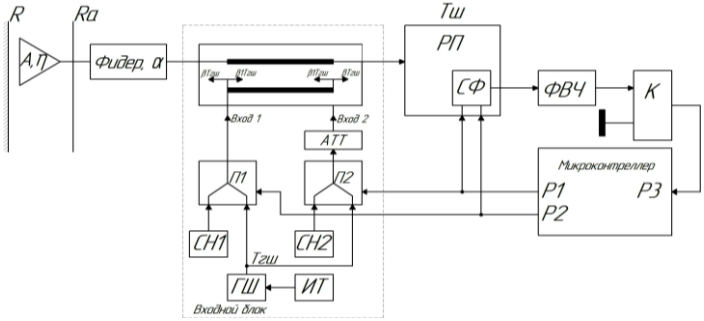


Рис. 1. Структурная схема радиометрического измерителя модуля коэффициента отражения: А – антенна; $П_1$ и $П_2$ – сверхвысокочастотные переключатели; $СН_1$ и $СН_2$ – согласованные нагрузки; ГШ – генератор шума; ИТ – источник тока; РП – радиометрический приемник; СФ – синхронный фильтр низких частот; ФВЧ – фильтр верхних частот; К – компаратор; АТТ – аттенюатор

Целью данной работы является создание модели для рассмотрения влияния неидеальности узлов во входном тракте измерителя на точность измерителя модуля коэффициента отражения с использованием аттенюатора и получение расчетных соотношений.

Из работы [2] следует, что на выходе входного блока измерителя формируются три уровня шумовых сигналов – *A*, *B* и *C*, учитывающие влияние коэффициента ослабления аттенюатора. Сигналы *A* и *C* не меняются относительно [2], коэффициент ослабления аттенюатора оказывает влияние только на сигнал B.

$$\text{Сигнал } A = T(1-R)\alpha^2(1-\beta-\beta_1)[R_a+(1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty}R^n\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}]+T_{ш}(1-R).$$

$$\text{Сигнал } B = T(1-R)\alpha^2(1-\beta-\beta_1)[R_a+(1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty}R^n\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}]+$$

$$+T_{гш}\beta_1\gamma\alpha^2(1-\beta-\beta_1)[R_a+(1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty}R^n\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}]+T_{гш}\beta\gamma+T_{ш}(1-R). \quad (1)$$

$$\text{Сигнал } C = T(1-R)\alpha^2(1-\beta-\beta_1)[R_a+(1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty}R^n\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}]+$$

$$+T_{гш}\beta\alpha^2(1-\beta-\beta_1)[R_a+(1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty}R^n\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}]+T_{гш}\beta_1+T_{ш}(1-R),$$

где R и R_a – модули коэффициента отражения по мощности, на границе «антенна – исследуемая среда» и «антенна – фидер»; T – эффективная шумовая температура объекта; $T_{гш}$ – температура шумов генератора шума; β и β_1 – коэффициенты связи линий в направленном ответвителе, в прямом и обратном направлении; α – коэффициент затухания сигнала в фидере; $T_{ш}$ – собственные шумы измерителя; γ – коэффициент ослабления аттенюатора.

После подстановки (1) в уравнение установления нулевого баланса и проведения простых преобразований балансного соотношения относительно коэффициента отражения и учитывая, что максимальная погрешность коэффициента отражения R возникает, когда длительность $t_{шис}$ принимает значения, равные нулю и $t_{аим}$,

для $t_{шис} = 0$

$$\sum_{n=1}^{\infty}R^n_{(0)} = -\frac{1}{(1-R_a)^2\sum_{m=1}^{\infty}\eta^{2m}R_a^{m-1}}\left[\frac{\beta_1}{\beta}\times\frac{1}{\alpha^2(1-\beta-\beta_1)}+R_a\right]; \quad (2)$$

для $t_{шис} = t_{аим}$

$$\sum_{n=1}^{\infty} R^n{}_{(1)} = -\frac{1}{(1-R_a)^2 \sum_{m=1}^{\infty} \eta^{2m} R_a^{m-1}} \left[\frac{\beta\gamma - \beta_1}{\beta - \beta_1\gamma} \times \frac{1}{\alpha^2(1-\beta-\beta_1)} - R_a \right]. \quad (3)$$

Коэффициент затухания аттенюатора входит в выражение при $t_{шис} = t_{аим}$. Следовательно, настройку γ можно получить в случае установления погрешности измерения для максимальной шкалы, т.е. $R_{(1)} = 1$.

$$\gamma = \frac{\alpha^2\beta(1-\beta-\beta_1)[R_a - (1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty} R^n \sum_{m=1}^{\infty} \eta^{2m} R_a^{m-1}] + \beta_1}{\alpha^2\beta_1(1-\beta-\beta_1)[R_a - (1-R_a)\sum_{n=1}^{\infty} R^n \sum_{m=1}^{\infty} \eta^{2m} R_a^{m-1}] + \beta}.$$

Для примера, задаваясь значениями из [3] $\alpha = 0{,}891$; $\eta = 0{,}95$; $\beta = 0{,}1$; $\beta_1 = 0{,}005$; $R_a = (\text{КСВН}^2 - 1)/(\text{КСВН}^2 + 1)$ (при КСВН = 1,5); $R_a = 0{,}04$; $n = m = 1$, значение коэффициента ослабления аттенюатора будет равным 0,549 ($\gamma = 0{,}549$). Если настроить аттенюатор на полученное значение коэффициента ослабления сигнала генератора шума, то можно будет ликвидировать погрешность в конце шкалы преобразования. Регулировка аттенюатора осуществляется в процессе калибровки.

Для устранения погрешности в антенне прикладывается идеальный отражатель (гладкий металлический лист), а длительность $t_{шис}$ устанавливают равной $t_{аим}$. Регулировку производят до установления нулевого баланса [3].

Как следует из (2), погрешность в начале шкалы не зависит от γ, а определяется только соотношением

$$\frac{\beta_1}{\beta} = \frac{R_{(0)}}{R} - \frac{R_a}{R^2}.$$

Решая уравнения относительно β_1, учитывая, что $\beta^2 << K << \beta$ при $K = 1/(1-R_a)^2\alpha^2\eta^2$, получим

$$\beta_1 = \frac{\beta[R_{(0)}K - R_a]}{K^2}.$$

Если принять погрешность в начале измерительной шкалы равной 0,1 ($R_a = 0{,}1$), тогда при значениях $\beta = 0{,}1$ и 0,05 из (3) получим β_1, равную 0,0059 и 0,0029. Для другого значения погрешности $R_a = 0{,}05$ β_1 будет равна –0,0016 и –0,0008.

Из расчетов следует, что при уменьшении погрешности в начале шкалы наблюдается существенное уменьшение значения β_1.

Рассмотрено влияние на точность измерений неидеальности узлов во входном тракте измерителя коэффициента отражения с использованием шумового сигнала и аттенюатора.

Получены выражения для расчёта коэффициента отражения R с учетом коэффициента отражения R_a и аттенюатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев А.Г. О некоторых характерных признаках в диагностике патологии молочных желез по данным микроволновой радиотермометрии // Современные проблемы науки и образования. – М., 2014. – С. 254–261.

2. Канина М.А. Оценка влияния неидеальности параметров высокочастотных узлов входного блока измерителя коэффициента отражения на точность измерений // Перспективы развития фундаментальных наук. – Томск, 2020. – В печати.

3. Филатов А.В. Две модели измерителя модуля коэффициента отражения в широкой полосе частот методами микроволновой радиометрии / А.В. Филатов, Н.Ю. Белов, С.Е. Тарасов, Н.А. Филатов, А.Г. Лощилов // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2017. – Т. 20, №4. – С. 50–54.

УДК 621.372

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОДЛОЖЕК

Г.А. Малютин, студент; В. Поздняков, магистрант

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

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, ndm@main.tusur.ru

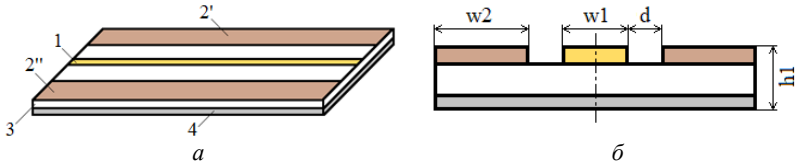
Определены погонные параметры полосковой линии передачи по измеряемой матрице рассеяния.

Ключевые слова: копланарная полосковая линия, параметры рассеяния, погонные параметры, рефлектограмма.

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости материалов $\dot{\varepsilon}$ в широкой полосе частот основывается на разных физических принципах и методах их реализации [1, 2]. Так или иначе выбор метода определения $\dot{\varepsilon}$ зависит от технических особенностей применения диэлектрика. Если диэлектрический материал предназначен для построения волноводных фильтров, логично измерять $\dot{\varepsilon}$ резонансным методом в узких полосах частот работы проектируемых фильтров.

Определение $\dot{\varepsilon}$ в широкой полосе частот показано в работе [3] на примере копланарной полосковой линии (КПЛ).

В настоящей работе поставлена цель определения погонных параметров КПЛЭ, показанной на рис. 1, по измеряемым параметрам матрицы рассеяния s. Найденные таким образом погонные емкости КПЛЭ используются для расчета относительной диэлектрической проницаемости исследуемого материала [3].



а *б*

Рис. 1. Конструкция копланарной полосковой линии (*а*) и ее поперечное сечение (*б*): *1* – токонесущая полоска; *2′, 2″* – боковые планарные экраны; *3* – подложка; *4* – нижняя экранирующая плоскость

Рассмотрим определение погонных параметров конструкции КПЛ аналогично тому, как это сделано в работе [4] при решении задачи определения погонных параметров связанных линий.

Исходными данными для решения поставленной задачи служат длина отрезка КПЛ l и экспериментально измеренная матрица коэффициентов рассеяния при равных нагрузках $Z_{H1} = Z_{H2} = 50$ Ом. В процессе измерений на векторном анализаторе цепей Obzor-103 была получена матрица рассеяния s, коэффициенты которой являются функциями частоты f. Отрезок КПЛ имел следующие поперечные размеры: $w1 = 2{,}4$ мм, $w2 = 12{,}8$ мм, $d = 1$ мм, $h1 = 1{,}5$ мм, длина отрезка $l = 112$ мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_{r1} = 4{,}5$. Последовательность решения задачи определения погонных параметров КПЛ следующая:

1. Получив экспериментально матрицу рассеяния $s(f)$, переходим к классической нормированной матрице передачи $A(f)$ по известным формулам связи $A(f)$ и $s(f)$ [5]:

$$[A] = \frac{1}{2 \cdot s_{21}} \cdot \begin{vmatrix} s_{12} \cdot s_{21} - (1+s_{11})(s_{22}-1) & (1+s_{11})(1+s_{22}) - s_{12} \cdot s_{21} \\ (1-s_{22})(1-s_{11}) - s_{12} \cdot s_{21} & (1-s_{11})(1+s_{22}) + s_{12} \cdot s_{21} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

2. Далее переходим к ненормированной матрице передачи $\hat{a}$ по известной формуле [5].

3. Теперь воспользуемся известной формой записи матрицы отрезка линии передачи с Т-волной

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{ch}(\gamma l) & Z_0 \mathrm{sh}(\gamma l) \\ Z_0^{-1} \mathrm{sh}(\gamma l) & \mathrm{ch}(\gamma l) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

из которой, считая, что $a = \hat{a}$, получаем формулы (3) для вычисления коэффициента распространения γ и определения характеристического сопротивления Z_0:

$$\gamma = \operatorname{arccosh}(\hat{a}_{11}) \cdot \frac{1}{l}, \; Z_0 = \hat{a}_{12} \cdot \frac{1}{\sinh(\gamma \cdot l)}. \quad (3)$$

Из эквивалентной схемы отрезка линии передач с Т-волной определим комплексные сопротивление ZL и проводимость YC:

$$ZL = jwL_0 + R_0, \; YC = jwC_0 + G_0,$$

где L_0, R_0, C_0 и G_0 – искомые погонные параметры КПЛ. Тогда запишем следующие уравнения:

$$\gamma = \sqrt{ZL \cdot YC}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{ZL}{YC}}. \quad (4)$$

Отсюда определяем комплексную проводимость и комплексное сопротивление:

$$YC = \frac{\gamma}{Z_0}, \; ZL = \gamma \cdot Z_0. \quad (5)$$

4. По найденным YC и ZL определяем погонные емкость, проводимость, индуктивность и сопротивление КПЛ:

$$C_0 = \mathrm{Im}(YC), \; G_0 = \mathrm{Re}(YC), \; L_0 = \mathrm{Im}(ZL), \; R_0 = \mathrm{Re}(ZL).$$

Расчет погонных параметров по формулам (1)–(5) показал значительное расхождение значений C_0 и L_0 по отношению к значениям, полученным методом конформных отображений. Моделирование позволило установить, что причина этого – наличие существенного отражения из-за неоднородностей на входе и выходе макета КПЛ, особенно на коаксиально-полосковых переходах. Снижение влияния погрешностей, возникающих на входе и выходе измеряемого отрезка полосковой линии, было достигнуто в результате переноса плоскости отсчета при анализе рефлектограмм, полученных с помощью стенда для измерения импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов [6]. Был применен метод исключения участков рефлектограммы, которые соответствуют коаксиально-полосковым переходам и нагрузке. На рис. 2 показана рефлектограмма отрезка КПЛ, нагруженного на сопротивление 50 Ом при воздействии импульса длительности 40 пс.

На рис. 3 и 4 показаны результаты расчета погонной емкости C_0 и погонной индуктивности L_0 в широком диапазоне частот по формулам (3)–(5) после выполнения описанной процедуры.

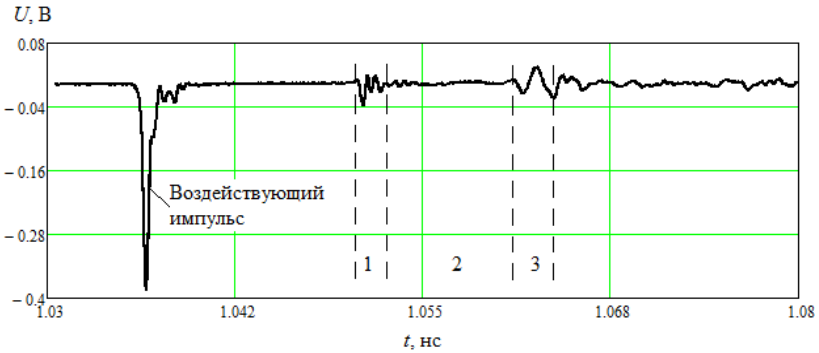


Рис. 2. Рефлектограмма отрезка КПЛ: *1* – участок отражения от входного коаксиально-полоскового перехода; *2* – участок регулярной части КПЛ; *3* – участок отражения от выходного коаксиально-полоскового перехода и нагрузки

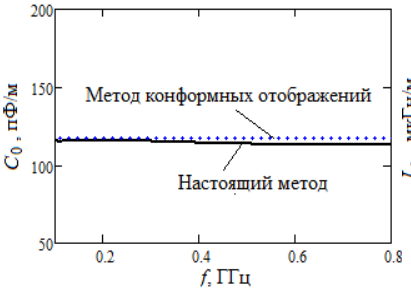


Рис. 3. Частотная зависимость погонной емкости КПЛ

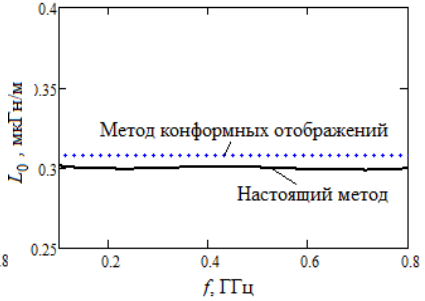


Рис. 4. Частотная зависимость погонной индуктивности КПЛ

Рисунки показывают зависимость погонной емкости C_0 и погонной индуктивности L_0 в широком диапазоне частот. Отклонение C_0 и L_0 от значений, рассчитанных методом конформных отображений, составляет в среднем для емкости 2,9%, а для индуктивности 2,5%.

Таким образом, показана возможность определения погонных параметров полосковых линий передачи по известным парметрам рассеяния. Приведенные результаты будут полезны при исследовании

распределенных элементов и устройств на основе коаксиальных и других типов линий передачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEWM-2020-0039 от 01.03.2020. Измерения проведены на оборудовании ЦКП «Импульс», проект № 075-15-2019-1644 от 08.11.2019 г. ID RFMEFI62119X0029.

ЛИТЕРАТУРА

1. Донченко А.В., Заргано Г.Ф., Хемляков В.В. Методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости в гребневом волноводе // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 27–28 Sept. – 2018. – P. 350–355.

2. Belyaev B.A., Drokin N.A., Leksikov A.A. Investigation of materials at microwave frequencies using microstrip sensors // Russian Physics Journal. – 2006. – Vol. 49, № 9. – P. 952–959.

3. Malyutin G.A. Quasi-static Analysis of a Coplanar Strip Line with Shielding Planes Used as a Distributed Sensor / SIBIRCON–2019. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. – 2019. – № 8957860. – P. 125–129.

4. Сычев А.Н. Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах. – Томск: Том. гос. ун-т, 2001. – 318 с.

5. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ. – М.: Связь, 1971. – 388 с.

6. Малютин Н.Д., Федоров В.Н. Стенд для измерения импульсных и частотных характеристик сверхширокополосных объектов. Пат. RU194888 (ПМ). – Заявл. 28.08.2019, опубл. 26.12.2019. – Бюл. № 36.

УДК 621.382.211

МЭМС-СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ТОРСИОННЫХ ПОДВЕСОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д.В. Науменко, аспирант;
И.Е. Лысенко, зав. каф. КЭС, д.т.н., доцент;
С.А. Синютин, зав. каф. ВиРС ИРТСУ ЮФУ, к.т.н., доцент;
О.А. Ежова, преп. КЭС, к.т.н.
г. Таганрог, Южный федеральный ун-т, КЭС ИНЭП ЮФУ,
danil.naumenko@gmail.com

Микроэлектромеханические акселерометры широко применяются для контроля технологических процессов, например, для измерения наклона различных технологических емкостей, буровых установок, мобильных кранов, либо измерения вибрации рабочего инструмента, отдельных частей технологического оборудования. В работе представлен МЭМС-акселерометр оригинальной конструкции, осо-

бенностью которого является применение высокоаспектных торсионных подвесов. Приведены результаты конечно-элементного анализа конструкции.
Ключевые слова: МЭМС-акселерометр, торсионный подвес, конечно-элементный анализ.

Разработка интегральных микромеханических акселерометров является актуальной задачей. Увеличение толщины приборного слоя инерциальных сенсоров, изготавливаемых по объемной технологии благодаря развитию технологии глубокого реактивно-ионного травления (DRIE) позволяет создавать конструкции с толщиной приборного слоя более 100 мкм и аспектным отношением до 1:50 [1]. Такие конструкции позволяют увеличить инерционную массу без увеличения площади чувствительного элемента, благодаря чему можно уменьшить шум, увеличить чувствительность и уменьшить стоимость чувствительного элемента МЭМС. Выход за пределы плоскости пластины возможен только за счет деформации кручения, успешная ее реализация способствует созданию многоосевых сенсоров линейных ускорений [2], а также может быть применена при разработке других микромеханических приборов, например, сборщиков энергии, микропереключателей, микрозеркал.

Чувствительный элемент осевого МЭМС-акселерометра предназначен для измерения ускорения перпендикулярного плоскости подложки. Этот так называемый *z*-axis акселерометр [3] (рис. 1, *а*) выполнен из проводящего монокристаллического кремния и содержит инерционную массу *1*, соединенную с помощью четырех модифицированных кососимметричных *z*-образных упругих подвесов *2* с анкерными опорными элементами *6*.

Анкерные элементы имеют металлические контактные площадки *5* и установлены на стеклянной подложке *8* (рис. 1, *б*), также контактные площадки *4* имеют емкостные гребенки *3*, которые используются для измерения модуля ускорения. Обкладка *7* также образует емкостной элемент, служащий для определения направления ускорения по вертикальной оси.

Модифицированный подвес МЭМС-акселерометра показан на рис. 2 и состоит из облегченной жесткой балки *1* и пары вертикальных торсионных балок *2* и *3*. Торсионная балка *2* состоит из двух параллельно соединенных торсионных элементов, что позволяет за счет разноса первичных торсионных элементов изолировать деформацию кручения от деформации изгиба.

Для исследования работы акселерометра была построена конечно-элементная модель. Результат модального анализа показан на рис. 3.

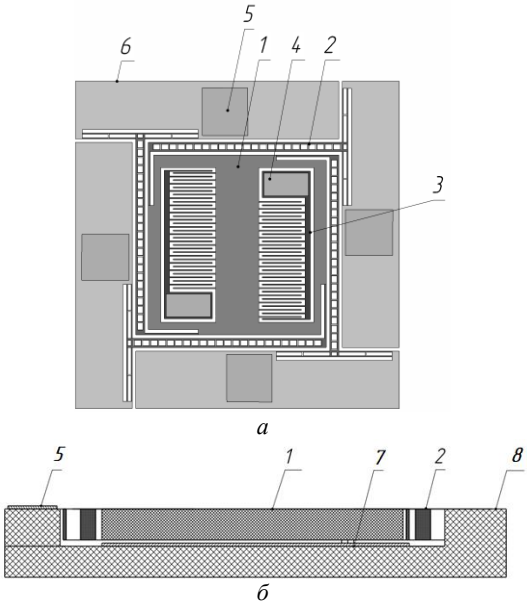


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента МЭМС акселерометра

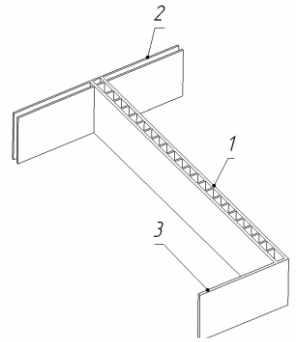
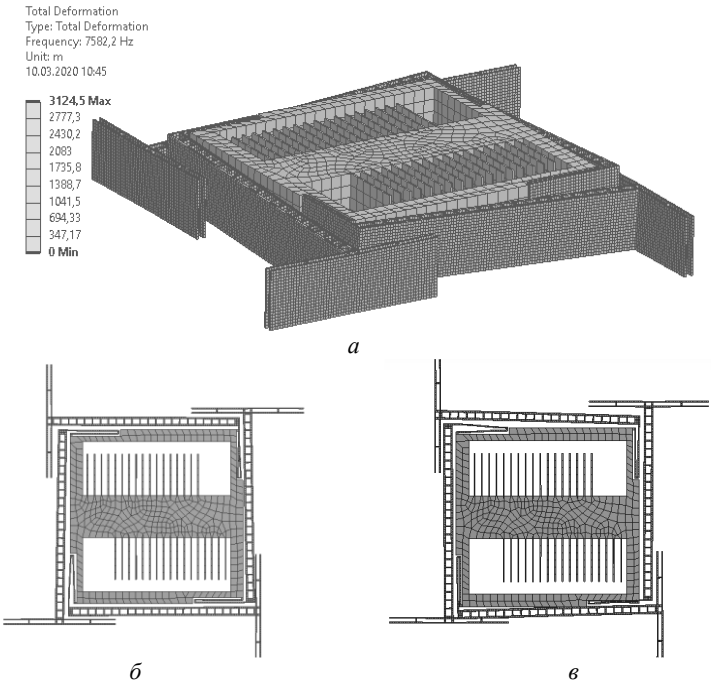


Рис. 2. Конструкция подвеса акселерометра

Первой моде колебаний с собственной частотой 7582 Гц соответствует деформация, перпендикулярная плоскости. Между тем вторая (рис. 3, *б*) и третья (рис. 3, *в*) моды колебаний происходят в плоскости кремния на частотах 10459 и 10465 Гц соответственно.

Амплитуда перемещений получена в результате статического анализа и пропорциональна величине действующего воздействия. При ускорении в 1 g: 4,5 нм по оси *Z* и 2,2 нм по оси *X*, *Y*.



а

б *в*

Рис. 3. Моделирование работы МЭМС-акселерометра

Предложена конструкция интегрального микромеханического акселерометра. Конструкция показала свою работоспособность и имеет перспективы для производства. При дальнейшей доработке конструкции следует обратить внимание на изоляцию вторичных мод колебаний, проверить на стойкость к температурным воздействиям и вибрации, а также рассмотреть возможность уравнять частоты для получения трехосевого акселерометра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта № 19-37-90136/19 «Разработка фундаментальных основ построения высокоаспектных торсионных подвесов для инерциальных МЭМС-сенсоров».

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhu J., Liu X., Shi Q. et al. Development Trends and Perspectives of Future Sensors and MEMS/NEMS // Micromachines. – 2020. – Vol. 11, No. 7.

2. Лысенко И.Е. Интегральные микромеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 180 с.

3. Caspani A., Comi C., Corigliano A., Langfelder G., Zega V., Zerbini S. A Differential Resonant Micro Accelerometer for Out-of-plane Measurements // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 87. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.569.

УДК 621.37

ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД

К.А. Сердюков, А.А. Новикова, студенты
Научный руководитель А.В. Филатов, проф., д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, konstantinserdyukov@gmail.com
Проект ГПО КУДР-1903 «Программно-аппаратный комплекс для диагностики функционального состояния человека»

Описан измеритель коэффициента отражения различных материалов в широком микроволновом диапазоне, который проводит измерения при помощи зондирования низкоинтенсивным шумовым сигналом, принцип действия основан на нулевом методе измерений. Применение данного измерителя позволит избавиться от недостатков, присущих аналогичным устройствам, сделать конструкцию проще и реализовать его в виде портативного.
Ключевые слова: микроволновая радиометрия, коэффициент отражения.

В современной медицине начинают широко использоваться физические принципы, связанные с изучением физических полей и излучений человека для диагностики здоровья. Для неинвазивного измерения глубинной температуры тела человека и животных используются микроволновые радиометрические системы [1]. Чтобы измерить глубинную температуру тела, нужно знать толщину кожи, жира и мышц. Измерив коэффициент отражения на разных длинах волн, можно рассчитать эти параметры. Для таких задач не подходят стандартные методы измерения коэффициента отражения с высокой интенсивностью монохроматического зондирующего сигнала из-за пагубного влияния такого сигнала на организм. Коэффициент отражения также необходимо знать для определения отражательных или поглощательных свойств материалов на определенных частотах, для калибровки широкоапертурных излучателей и т.д.

Существуют устройства, измеряющие коэффициент отражения в полосе шумовых частот с низкой интенсивностью зондирующего сигнала, например представленное в [2]. Зондирующий сигнал в этом устройстве создается генератором шума, регулируется аттенюатором и поступает через направленный ответвитель на антенну. Часть сигнала, пропорциональная коэффициенту отражения, отражается от объекта и поступает на радиометрический приемник, который измеряет его уровень. Измерение осуществляется методом сравнения коэффициента отражения с его образцовым значением. Такое устройство имеет ряд недостатков, наиболее значимые из них: большое вре-

мя проведения одного измерения (приходится менять местами исследуемый образец и эталонный), в процессе проведения измерений должны сохраняться коэффициент усиления и шумовая температура устройства, ручной режим проведения измерений. Аттенюатор частично излучает шум, который прибавляется к сигналу генератора шума, температура аттенюатора должна быть равна температуре согласованной нагрузки направленного ответвителя, иначе через него будут протекать дополнительные токи. Вследствие этих недостатков устройство не может применяться для проведения высокоточных измерений.

Чтобы исключить недостатки данного устройства, можно использовать схему, представленную на рис. 1. Устройство состоит из антенны А, прикладывающейся к объекту измерений, входного блока, состоящего из направленного ответвителя НО, электронных ключей П1 и П2, которые с помощью микроконтроллера подключаются или к генератору шума, или к согласованной нагрузке, радиометрического приемника РП, состоящего из усилителя высоких частот, квадратичного детектора, низкочастотного усилителя и синхронного фильтра, управляемого с помощью контроллера, фильтра высоких частот ФВЧ, компаратора К и микроконтроллера МК.

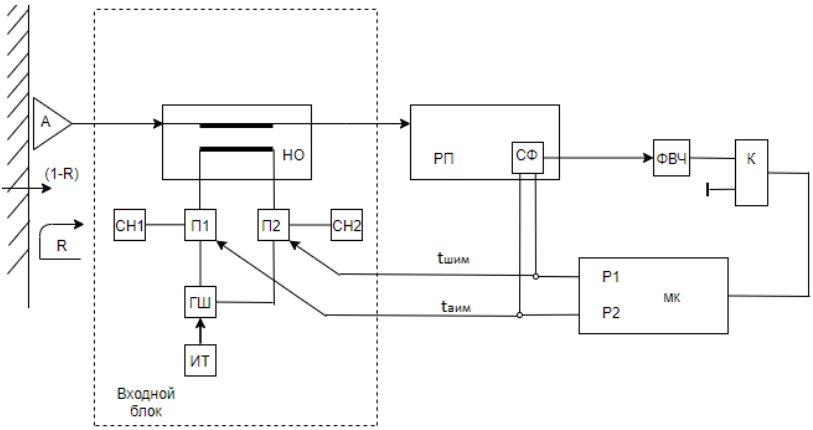


Рис. 1. Структурная схема измерителя модуля коэффициента отражения

В результате широтно-импульсной и амплитудо-импульсной модуляций на вход РП поочередно поступают следующие уровни сигналов:

$$A = T(1 - R) + T_{ш}(1 + R),$$
$$B = T(1 - R) + \beta T_{гш} + T_{ш}(1 + R),$$
$$C = T(1 - R) + \beta T_{гш} R + T_{ш}(1 + R), \qquad (1)$$

где T – температура исследуемого объекта; β – коэффициент передачи направленного ответвителя; $T_{гш}$ – сигнал генератора шума; $T_{ш}$ – собственные шумы РП; R – коэффициент отражения «антенна–исследуемая среда».

Метод измерения устройства основывается на авторегулировании нулевого баланса, который устанавливается с помощью изменения длительности периода широтно-импульсного сигнала, и в случае установленного баланса длительность широтно-импульсного сигнала определяется из следующей формулы [2]:

$$-t_{шис} = (C - A)\, t_{м} /(B - A), \qquad (2)$$

где $t_{шис}$ – длительность широтно-импульсного сигнала; $t_{зим}$ – длительность импульсного сигнала; A, B и C – уровни сигналов на входе радиометрического приемника при различном подключении электронных ключей. Подставив соответствующие выражения из (1), получим

$$R = t_{шис} / t_{зим}. \qquad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что зависимость между определяемым коэффициентом отражения R и длительность широтно-импульсного сигнала $t_{шис}$ линейная, значит, при полном отражении $R = 1$ $t_{шис} = t_{зим}$. Если объект исследования будет являться абсолютно черным телом, $R = 0$, то $t_{шис} = 0$.

В уравнение (3) не входит $T_{гш}$, значит, точность определения коэффициента отражения не зависит от низкочастотных флуктуаций сигнала генератора шума. Генератор шума должен сохранять стабильность на периоде симметричного импульсного сигнала $t_{зим}$. Достоинством данного устройства является возможность проведения измерений в реальном времени, регулировка $t_{ши}$ производится микроконтроллером, а также устройство возможно реализовать в виде портативного. Погрешность данного измерителя получается существенно меньше, чем у устройства из [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Маречек С.В. Оценка толщины приповерхностных слоев биологической ткани по измерению комплексного коэффициента отражения на одной частоте СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков, Ю.Г. Тищенко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 1. – С. 16.

2. Скрипник Ю.А. Измерение коэффициента отражения в шумовых электромагнитных полях / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, К.Л. Шевченко, А.А. Ваганов // Радіоапаратобудування. Серія: Радіотехніка. – 2011. – № 44.

3. Филатов А.В. Радиометрический измеритель модуля коэффициента отражения / А.В. Филатов, А.В. Убайчин // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 1. – С. 1–5.

УДК 629.052.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH

А.К. Пащенко, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.Г. Лощилов, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, pashchenko.anton.k@mail.ru

Приводятся результаты определения местоположения Bluetooth объектов внутри помещения методом трилатерации. При проведении исследований использовались смартфон и микроконтроллер BGM111-A, поддерживающие протокол Bluetooth 4.2.

Ключевые слова: indoor-позиционирование, Bluetooth, определение местоположения, BGM111, трилатерация.

Позиционирование внутри помещений может быть очень полезным при ориентации людей в больших, ранее не знакомых им помещениях, подобных аэропортам, торговым центрам, пакровкам или большим офисным комплексам.

На сегодняшний день большинство мобильных устройств способно определить свои координаты при помощи сетей GPS, ГЛОНАСС и базовых станций сотовых операторов или GSM-связи.

Выделенные системы показывают хорошие результаты при навигации на открытой местности. Так, при использовании систем GPS, при хорошем уровне сигнала со спутниками, возможно получить координаты с точностью до 0,7 м [1]. Однако рассмотренные технологии непригодны для позиционирования в больших многоэтажных зданиях.

В последнее время набирает популярность indoor-навигация, использующая в своей основе Bluetooth модули [2, 3]. И это вполне логично, ведь BLE модули потребляют меньше энергии, нежели аналогичные модули Wi-Fi или ZigBee (таблица).

Сравнение беспроводных технологий

	Wi-Fi	ZigBee	Bluetooth
Точность определения, м	5	1–3	1
Радиус действия, м	5–50	300	10–100
Рабочая частота, ГГц	2,4 и 5	2,4	2,4
Потребление энергии (активный; спящий)	15 мА; 20 мкА	40 мА; 0,4 мкА	8,7 мА; 2,1 мкА

Также с применением Bluetooth 5.1 появилась возможность определения угла входного сигнала [4]. Таким образом, выбор был остановлен именно на этой технологии.

В качестве целевого устройства, на базе которого в дальнейшем могут быть разработаны метки для отслеживания передвижения объектов и базовые станции, был выбран микроконтроллер Wireless Gecko BGM111 [5]. Это модуль, предназначенный для проектирования Bluetooth устройств, для которых ключевыми факторами являются надежность радиосвязи, низкое энергопотребление и простота разработки приложений. В используемом контроллере реализована технология Bluetooth 4.2, так как на данный момент устройства на ее основе наиболее распространены.

В качестве способа определения местоположения целевого устройства был выбран метод трилатерации [6], заключающийся в измерении RSSI объекта в трех базовых точках (рис. 1) и сводящийся к решению такой геометрической задачи, как определение точки пересечения трех окружностей.

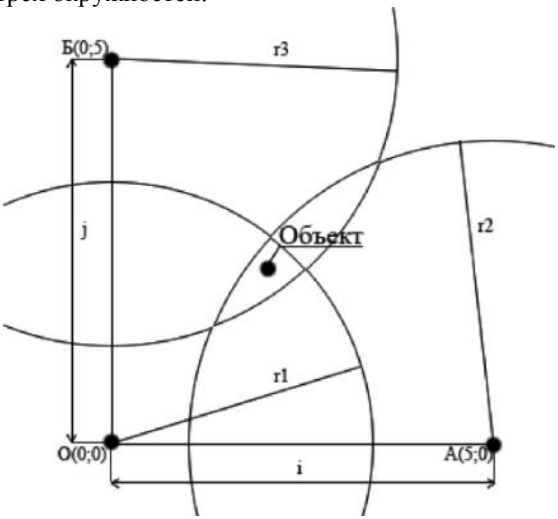


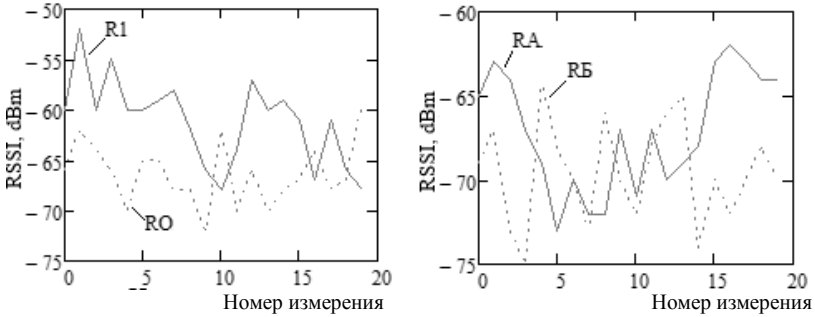
Рис. 1. Схема измерения

При проведении первичных измерений значение RSSI в каждой базовой точке фиксировалось единожды. В результате были получены координаты целевого устройства с погрешностью 1 м.

Затем в каждой базовой точке снималось несколько значений RSSI, после чего показания были усреднены (рис. 2). Время, затраченное на получение одного графика (20 измерений), составило приблизительно 1 мин.

По полученным средним значениям RSSI были вычислены координаты целевого устройства. Погрешность определения составила

15 см, или 6%, при учете размещения целевого устройства на расстоянии 2,12 м по оси *ОА* и 2,27 м по оси *ОБ* от точки *О* (см. рис. 1).



а *б*

Рис. 2. Нестабильность мощности Bluetooth-сигнала:
а) R1 – RSSI на 1 м; RO – RSSI в О; *б*) RA – RSSI в А; RБ – RSSI в Б

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что выбранная методика подходит для определения местоположения неподвижных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. GPS Accuracy // GPS.gov. – 2019. – URL: https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/ (дата обращения: 07.03.2020)

2. Яковенко И.А. Навигация внутри помещений. Обзор и сравнительный анализ технологий: GSM, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, RFID, NFC // Молодежный научно-технический вестник. – 2015. – № 6. – 42 с.

3. Костык И.Н. Сравнение эффективности позиционирования для сетей Bluetooth, Wi-Fi и ZigBee // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2015. – Т. 3, № 2. – С. 53–61.

4. Bluetooth 5.1: What's New and Why It Matters // How-To Geek. – 2019. – URL: https://www.howtogeek.com/403606/bluetooth-5.1-whats-new-and-why-it-matters/ (дата обращения: 08.03.2020).

5. BGM111 Wireless Gecko Bluetooth® Module Data Sheet // Silicon Labs. – 2019. – URL: https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/BGM111_datasheet.pdf (дата обращения: 07.03.2020).

6. Лавров Д.Н. Математическая модель обнаружения точки беспроводного доступа по измерениям мощности излучения разнесёнными наблюдателями / Д.Н. Лавров, О.А. Вишнякова, С.Ю. Лаврова // Математические структуры и моделирование. – Омск: Ом. гос. ун-т, 2013. – Т. 28, № 2. – С. 49–59.

УДК 638.14.071

УСТРОЙСТВО ЖУРНАЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЧЕЛИНОГО УЛЬЯ

А.К. Пащенко, студент

Научный руководитель А.Г. Лощилов, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, pashchenko.anton.k@mail.ru

Рассматривается вариант устройства для журналирования акустического излучения пчелиного улья, принимающего сигналы из нескольких точек улья, с целью снижения влияния случайных составляющих.

Ключевые слова: журналирование акустических сигналов, улей, пасека, ведение пасечного хозяйства, проектирование аппаратуры.

В связи с тем, что данные, изложенные в научных трудах [1, 2], разнятся, было предложено разработать устройство журналирования акустического излучения улья с целью экспериментальной проверки методик, представленных в источниках [1, 2], и разработки конечных алгоритмов определения состояния пчелосемей.

Ранее уже предлагались некоторые варианты конструктивного исполнения устройств журналирования [3, 4], однако они оказались недостаточно практичными. Например, в обоих вариантах отсутствовала возможность автономной работы. Как следствие, устройство управления (рис. 1) и само устройство мониторинга (рис. 2) были переработаны.

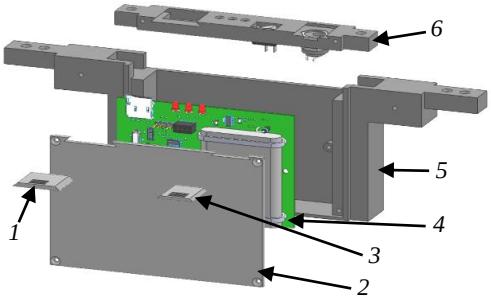


Рис. 1. Устройство управления: *1* – крышка microSD; *2* – крышка корпуса; *3* – крышка разъёма питания; *4* – узел печатный; *5* – основание; *6* – панель

Крышки для microSD карты *1*, корпуса *2* и разъема питания *3* были спроектированы таким образом, чтобы обеспечить легкий доступ к обозначенным объектам и их защиту от попадания пыли и влаги. Сам корпус получился сборный ввиду наличия на печатном узле большого количества разъемов *4* и состоит из основания *5* и верхней панели *6*.

Конечный вариант устройства журналирования акустического излучения выполнен в форм-факторе дадановской рамки [5], представляет собой сплошную перегородку, при помощи которой пчеловод сможет ограничивать свободное пространство для пчелосемьи в период ее развития (рис. 2).

Устройство журналирования включает в себя сборную раму *3*, несущую в своем составе устройство управления, акустические датчики *1*, соединенные с устройством управления при помощи кабелей *5*, и пару стенок, выполняющих защитную функцию всей конструкции *2*, *4*.

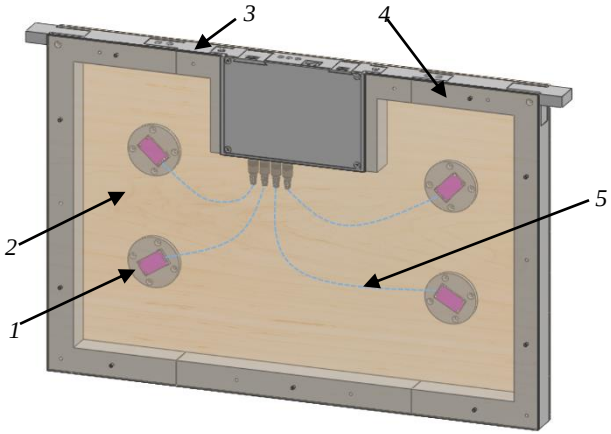


Рис. 2. Устройство журналирования в сборе:
1 – акустический датчик; *2* – передняя стенка; *3* – сборная рама;
4 – задняя стенка (полупрозрачная); *5* – кабельное соединение

Ранее, при проведении первичных исследований [6], возникли трудности при анализе спектра полученных записей акустического излучения, так как часто сигнал содержал жужжание одной пчелы либо канал был перегружен. Использование нескольких акустических датчиков (см. рис. 2) позволит избавиться от изложенных проблем, что положительно скажется на конечном результате анализа состояния всей пчелосемьи.

Устройство журналирования можно настроить при помощи внесения в файл конфигураций, хранящийся на microSD-карте, соответствующих правок. Таким образом, можно задать режим работы устройства, дату запуска в эксплуатацию, относительно которой будет производиться расчет последующей даты, количество и номера конкретных каналов, с которых требуется производить запись, частоту дискретизации сигнала.

По умолчанию устройство журналирования работает в режиме 10/50 (10 мин записи, 50 мин сна), запись ведется последовательно с каждого канала с частотой дискретизации 8 кГц. При таких настройках устройство может вести автономную запись в течение недели при емкости аккумулятора 2000 мА/ч.

Предложенный вариант устройства журналирования будет испытан в ближайшее время на опытной пасеке. С его помощью предполагается собрать базу акустического излучения пчелиных ульев, которая позволит найти зависимости положений максимумов спектральных составляющих от породы пчел и состояния роя в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еськов Е.К. Акустическая сигнализация общественных насекомых. – М.: Наука, 1979. – 209 с.

2. Рыбочкин А.Ф. Контроль состояния пчелиных семей по частотному спектру / А.Ф. Рыбочкин, И.С. Захаров // Международный сборник. – Швейцария, Лозанна, 1995. – С. 58.

3. Пащенко А.К. Система автоматизации пасечного хозяйства // Матер. регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – С. 365–358.

4. Пащенко А.К. Система мониторинга пасечного хозяйства // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 226–227.

5. Дадановские ульи своими руками. Ваша пасека – ваше царство // Bolshemeda. – 2019. – URL: http://bolshemeda.ru/pchelovodstvo/ulej-dadan.html (дата обращения: 07.03.2020).

5. Пащенко А.К. Измерение и анализ акустических сигналов пчелиных ульев // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 5 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. – С. 19–21.

УДК 621.371

ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

А.А. Новикова, К.А. Сердюков, студенты

Научный руководитель А.В. Филатов, проф. каф. ТОР, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, nerra_nerra@mail.ru

Проект ГПО КУДР-2001 «Разработка метода и устройства измерения глубинных и поверхностных температур биологических сред»

Рассмотрена модель оценки характеристик многослойной среды, а точнее слоев кожи и жира в биологической ткани, с использованием измерений коэффициента отражения по мощности на несколь-

ких частотах. Произведены оценка параметров трехкомпонентной среды биологической ткани и их динамика.
Ключевые слова: биологическая ткань, коэффициент отражения, толщина слоев кожи и жира, многослойная среда.

Оценка характеристик приповерхностной структуры биологической ткани «кожа–жир–мышцы» важна при неинвазивной оценке профильной температуры биологических тел, поскольку, не зная толщины слоев, нельзя построить корректный профиль температур. Эти характеристики применимы не только в медицине, но и в ветеринарии, например, позволят контролировать перегрев при проведении гипертермии. Под приповерхностной структурой понимается трехслойная модель «кожа–жир–мышцы». Мышечный слой рассматривается как полубесконечный, поскольку характеризуется сильным поглощением волн СВЧ-диапазона (рис. 1).



Рис. 1. Многослойная биологическая среда

Согласно рисунку, плоская волна распространяется из вакуума, имеющего диэлектрическую проницаемость ξ_0. Направление движения плоских волн перпендикулярно плоскостям всех слоев ($\theta = 0$); d_1 и d_2 – толщины слоев кожи и жира соответственно. В ходе работы исследуется отраженная волна, проводится расчет коэффициента отражения по мощности на различных частотах.

Система уравнения расчета представлена ниже:

$$R_0 = (\gamma_0 + R_1 \exp(-2k_1 d_1)) / (1 + \gamma_0 R_1 \exp(-2k_1 d_1)),$$

$$R_1 = (\gamma_1 + R_2 \exp(-2k_2 d_2)) / (1 + \gamma_1 R_2 \exp(-2k_2 d_2)),$$

$$R_2 = \gamma_2,$$

где $k_{1,2}$ – волновые числа соответствующих слоев; $\gamma_{1,2}$ – коэффициент отражения на границе между полупространствами.

Приведенные уравнения учитывают амплитуду и фазу коэффициента отражения. Фазовые измерения усложняют аппаратуру, поэтому решается вопрос, какую информацию можно получить, используя только модуль коэффициента отражения.

Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости кожной или мышечной ткани:

$$\xi_1(\nu) = 100\nu^{-0,1} + 2000\nu^{-1,3}.$$

Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости жировой ткани:

$$\xi_2(\nu) = 5,3\nu^{-0,008} + 500\nu^{-1,1} + 0,00006\nu.$$

В приведенных выше выражениях частота ν измеряется в мегагерцах (МГц).

Исходя из коэффициента отражения, рассчитываются частотные характеристики для некоторых толщин слоев кожи и жира, тем самым формируется база данных, которая может быть использована при практическом применении. То есть проводится модельный эксперимент с целью наработки базы данных, из которой при практическом получении коэффициента отражения можно выбрать наиболее подходящие характеристики.

В итоге мы имеем решение обратной задачи: по коэффициенту отражения находятся физические параметры – толщины слоев кожи и жира. Определено также, что для оценки слоев достаточно использовать две частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маречек С.В. Возможности оценки приповерхностной структуры биологической ткани по измерению коэффициента отражения на отдельных частотах СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2005. – № 11–12. – С. 480–485.

2. Маречек С.В. Оценка толщины приповерхностных слоев биологической ткани по измерению комплексного коэффициента отражения на одной частоте СВЧ-диапазона / С.В. Маречек, В.М. Поляков, Ю.Г. Тищенко // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2009. – № 1. – С. 16–19.

3. Филатов А.В. Нулевой метод в радиометрических измерениях. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2010. – 206 с.

УДК 62.189.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОРШНЕВОГО ДОЗАТОРА ПРОВОДЯЩИХ ПАСТ

А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова, магистранты

Научный руководитель С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, sandra_trufanova@mail.ru

Представлены результаты по отработке методики измерения пропускной способности поршневого дозатора для проводящих паст. Данные результаты позволяют определить оптимальное значение

силы продавливания для паст, основным реологическим параметром которых является вязкость.
Ключевые слова: аддитивные технологии, 2D-печать, печатная электроника, проводящая паста.

Области применения печатных технологий в электронной промышленности имеют большое разнообразие: от производства органических солнечных батарей до изготовления разнообразных пассивных и активных СВЧ-структур [1]. В качестве материала для изготовления печатной электроники применяются резистивные, диэлектрические и проводящие пасты.

На сегодняшний день для изготовления печатной электроники существует множество принтеров, различных по способу нанесения материала. Движение материала в емкости осуществляется за счет механического воздействия. Наиболее широкое распространение получили поршневые дозаторы. Перемещение поршня осуществляется под действием сжатого воздуха или за счет вращения двигателя. Однако в каждом из способов имеются существенные недостатки – большая инертность и ограничение по вязкости.

В работе [2] проведены исследования возможности изготовления СВЧ-устройств на примере СВЧ-фильтра. При этом печать осуществлялась с помощью принтера Voltera V-One. Однако рекомендуемая паста обладает сопротивлением 56 мОм/□, что приводит к большим потерям СВЧ-сигнала. Таким образом, существует необходимость в подборе аналогичных паст с высокой проводимостью для СВЧ-применения. Существуют специализированные пасты для СВЧ-применения, однако предназначены они для трафаретной технологии изготовления.

Для проведения экспериментальных исследований использовались проводящие пасты фирм «Дельта-пасты» [3] и «Элма-пасты» [4]. Выбор основывался на данных, полученных из литературных источников, и доступности на рынке. Выбранные пасты отличаются от рекомендуемых паст Voltera вязкостью, что вызывает сложность продавливания пасты через сопло. Предположительно это связано с тем, что не хватает мощности двигателя принтера. Целью экспериментальных исследований является оценка необходимой силы продавливания пасты через разный диаметр сопла.

Методика проведения экспериментальных исследований включает в себя следующие этапы:

1) подготовка проводящей пасты в соответствии с ТУ;

2) заправка шприца проводящей пастой;

3) выбор и установка сопла необходимого диаметра;

4) установка шприца с соплом (рис. 1);

5) приложение силы при помощи динамометра МЕГЕОН-03500 до момента начала вытекания пасты.

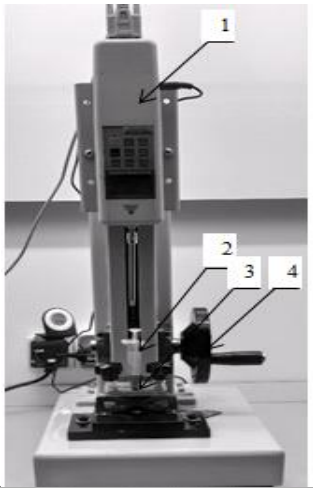


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – динамометр МЕГЕОН-03500;
2 – шприц; *3* – сопло;
4 – ручка регулировки приложенной силы

На рис. 2 показаны значения измерений силы продавливания проводящей пасты через сопло с разным диаметром.

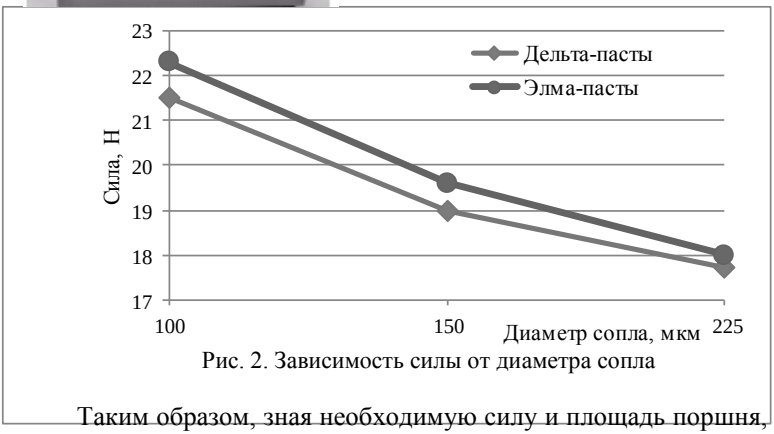


Рис. 2. Зависимость силы от диаметра сопла

Таким образом, зная необходимую силу и площадь поршня, можно рассчитать требуемое давление на поршень по формуле

$$P = F / S, \quad (1)$$

где P – давление, МПа; F – сила, Н; S – площадь поршня, мм^2.

В результате оценки силы продавливания проводящей пасты с применением поршневого дозатора и расчета давления можно сделать вывод, что давление на поршень должно быть больше, чем может обеспечить Voltera V-One. Поэтому следует использовать устройства нанесения паст на основе шнекового дозатора.

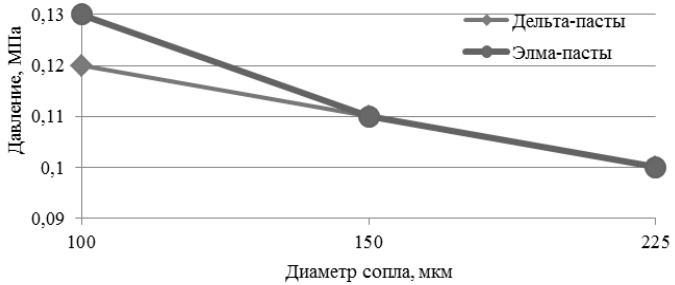


Рис. 3. Результат расчета давления (диаметр поршня 15 мм)

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (программа «Старт-цифровые технологии», договор № 15ГС1ЦТС10-D5/56048).

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / под. ред. Н.Д. Малютина. Авторы: Туев В.И., Малютин Н.Д., Копылова Т.Н. и др. Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2015. – 69 с.

2. Рамазанова С.А., Колесов К.С. Исследование возможности создания СВЧ-фильтра с использованием технологии принтерной печати // VIII регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», 2019. – Ч. 2 – С. 543–545.

3. ТУ 6365-010-59839838-2005. Пасты полимерные для гибких подложек. Технические условия. – М.: ООО «НПП ДЕЛЬТА-ПАСТЫ», 2005. – 15 с.

4. ЭПО.035.018ТУ Паста полупроводниковая серебряная. Технические условия. – М.: ООО «ЭЛМА_ПАСТЫ», 2007. – 11 с.

УДК 681.6/ 004.356

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПЛАСТИКА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ СВЧ-УСТРОЙСТВ

А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова,
Е.А. Иванчикова, магистранты каф. КУДР
Научный руководитель И.А. Екимова, доцент каф. КУДР, к.х.н.
г. Томск, ТУСУР, trufanovan1997@gmail.com

Представлены результаты по отработке методики измерения сопротивления токопроводящего пластика. Неравномерность распределения токопроводящих частиц в матрице полимера приводит к рассмотрению вопросов, касающихся режимов работы экструдера.

Ключевые слова: СВЧ-устройства, аддитивные технологии, 3D-печать, токопроводящий пластик, электрическое сопротивление.

Создание 3D-устройств путем послойного «выращивания» изделия из наносимого материала предполагает формирование объемной конструкции из различных пластических или металлических материалов. Данная технология позволяет получить устройства с новыми конструктивными и физико-техническими характеристиками: гибкость, легкость, функциональность и пр. Сегодня используют нетокопроводящие, токопроводящие полимерные материалы, а также их комбинации.

Технология изготовления СВЧ-устройств с применением нетокопроводящих полимерных материалов предполагает использование электрохимической металлизации [1]. Осаждение металлического подслоя включает в себя многостадийный долговременный процесс, который можно исключить путем использования токопроводящего пластика.

Анализ литературных источников [2–4] показывает, что в технологии изготовления СВЧ-элементов методом 3D-печати токопроводящим пластиком имеется ряд проблем:

– необходимость подбора и настройки печати для обеспечения повторяемости;

– проведение дополнительных исследований свойств полимерных материалов для обеспечения оптимальной внутренней структуры, адгезии и электрических характеристик готового изделия;

– отсутствие методик исследования выходных параметров готового изделия и исходного материала при возможной комбинации полимеров.

В данной работе представлены результаты исследования электрических характеристик токопроводящего пластика.

Для последовательного и корректного проведения исследований токопроводящего пластика предложена методика измерения сопротивления. В качестве материала использовали токопроводящий пластик двух видов: ABS и PETG. Измерение сопротивления проводилось с помощью миллиомметра Instek GOM-7804

Пластик, намотанный на катушку, подключали к зажимам миллиомметра. При помощи шагового двигателя вторая катушка вращалась и на нее наматывался токопроводящий пруток. В процессе протягивания прутка производили измерение сопротивления. Шаговый двигатель, вращая катушку, протягивал пруток и каждые два сантиметра останавливался для фиксации значения сопротивления.

В результате проведения измерений были получены значения электрического сопротивления и представлены на графике (рис. 1).

В результате выполнения работы была проведена оценка сопротивления токопроводящего пластика. Выявлено, что пластиковый

пруток имеет неравномерность распределения сопротивления. Это объясняется тем, что распределение токопроводящих частиц в пластике также не является равномерным.

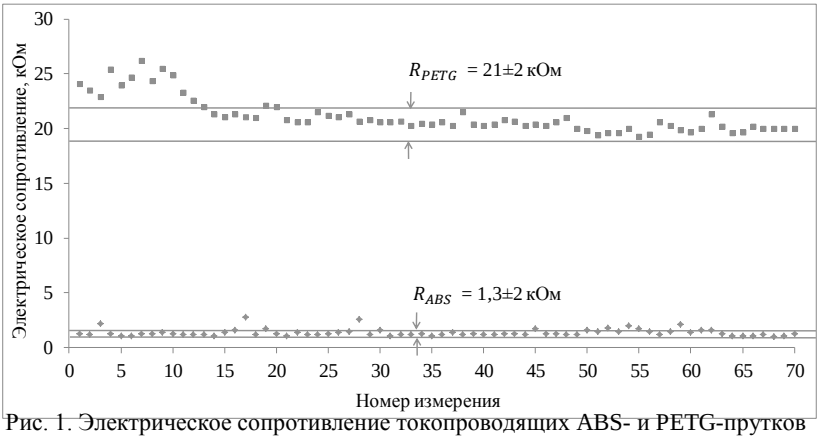


Рис. 1. Электрическое сопротивление токопроводящих ABS- и PETG-прутков

В связи с этим необходимо изучить состав и способы производства проводящих филаментов и рассмотреть варианты их модернизации. Кроме того, следует учитывать отработку режимов работы экструдеров филаментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rustambek U., Zdrok A.E., Ivanchikova E.A. Development of a plastic metallization technology // Перспективы развития фундаментальных наук. – Томск, 2019. – Т. 1. – С. 192–194.

2. Макаров А.В. Термоэлектрические характеристики электропроводящих композитов на основе смесей кристаллизирующихся и аморфных полимеров с техническим углеродом / А.В. Макаров, В.А. Гущин, В.А. Макаров // Сырье и вспомогательные материалы. Пластические массы. – 2019. – № 1-2. – С. 44–47.

3. Абдуллин М.И. Влияние природы технического углерода на реологические свойства полимерных композиций / М.И. Абдуллин, А.А. Басыров, А.С. Гадеев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – Науч. изд-во «Институт стратегических исследований», 2015. – № 12-1. – С. 39–43.

4. Кремзер Р.А. Поглотители КВЧ-излучения, полученные по аддитивной технологии / Р.А. Кремзер, А.В. Бадьин // XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск. – 2018. – Ч. 1. – С. 333–335.

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 535.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ITO НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

Л.В. Долматова, студентка
Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ФЭ, dolmatova.lyudmila99@gmail.com
Проект ГПО ФЭ-1203 «Спектральные методы анализа тонких диэлектрических плёнок»

Исследованы спектры отражения плёнок ITO, полученные методом магнетронного распыления на кремниевой подложке. Представлен анализ отражающих и пропускающих свойств плёнок оксида индия, легированного оловом.
Ключевые слова: оксид индия, легированный оловом, ITO, оптические свойства, отражение, пропускание.

ITO (indium tin oxide) является одним из наиболее широко используемых в различных областях техники металоокисных полупроводников. Уникальной особенностью плёнок ITO является сочетание электропроводности и их оптических свойств [1]. Наряду с высокой электрической проводимостью плёнки оксида индия, легированного оловом, могут обладать как отражающими свойствами, так и антиотражающими свойствами, что делает их пригодными для создания просветляющих покрытий для устройств оптоэлектроники и кремниевой солнечной энергетики [2].

Задачи исследования: исследовать спектры отражения плёнок ITO разной толщины, нанесенных на подложки из монокристаллического кремния, и методом спектральной эллипсометрии определить толщину и оптические свойства исследуемых образцов.

Объекты исследования: тонкие пленки оксида индий-олово, нанесенные на кремниевые подложки методом реактивного магнетронного распыления компактной мишени, состоящей из сплава индия и олова, в смеси газов аргона и кислорода.

Спектры отражения в диапазоне длин волн λ = 200–900 нм снимались с помощью спектрофотометра UV-2600/2700 (Япония), результаты представлены на рис. 1.

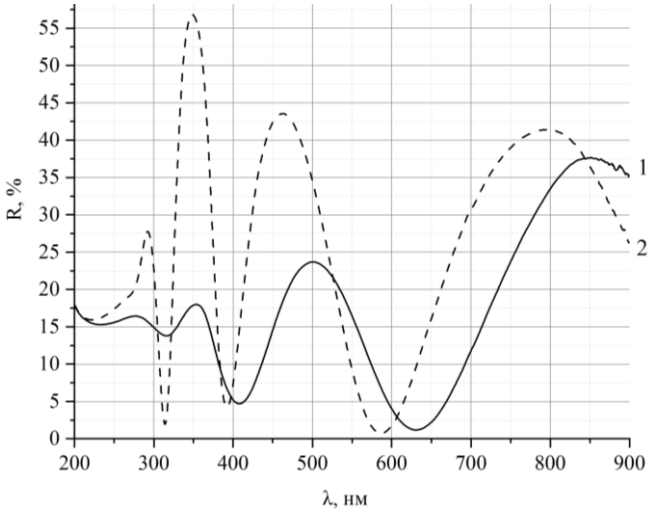


Рис. 1. Спектры отражения исследуемых образцов: *1* – № 1; *2* – № 2

Из полученных спектров отражения следует, что в исследуемой системе пленка–подложка наблюдаются интерференционные эффекты и по этой причине в системе возникают полосы или минимального отражения: для образца № 1 на длине волны λ = 632 нм, или максимального отражения на длине волны λ = 850 нм. Аналогичные результаты получены и для образца № 2 с другой толщиной пленки ITO.

Далее с помощью спектрального эллипсометрического комплекса «Эллипс 1891 САГ» были определены толщины и показатели преломления исследуемых образцов при углах падения поляризованного света от 45 до 70º с шагом 5º при длине волны λ = 632,8 нм.

Для определения толщины и показателя преломления плёнки через эллипсометрические углы ψ и Δ, измеренные эллипсометром при различных углах падения поляризованного света, а также показателя преломления и поглощения подложки использовалась дополнительная программа «Project». Программа выводит результаты измерений и рассчитанные значения показателя преломления и толщины плёнки.

Результаты измерений представлены в таблице.

Из таблицы следует, что исследуемые пленки действительно отличаются не только толщиной, но и показателем преломления, хотя и получены одним методом и на одной установке.

Результаты измерения оптических параметров исследуемых образцов

Угол падения, °	Образец №1				Образец №2			
	ψ	Δ	*n*	*d*, нм	ψ	Δ	*n*	*d*, нм
45	27,2	131	2,14	215,8	14,3	109	2,26	174,9
50	25,0	120	2,15	215,0	17,5	99	2,36	183,9
55	23,5	107	2,15	214,8	19,1	119	2,37	183,9
60	22,9	91	2,15	215,4	20,4	133	2,43	181,7
65	23,6	72	2,15	216,2	15,8	141	2,49	186,9
70	25,6	56	2,14	216,9	20,0	157	2,51	185,5
Ср. знач.			2,15	215,7			2,40	182,8

Заключение: в ходе исследования были получены спектры отражения плёнок ITO разной толщины, по полученным спектрам установлено, что плёнки ITO могут обладать как отражающими, так и пропускающими свойствами в узком диапазоне длин волн падающего излучения.

Таким образом, пленки толщиной 216 и 183 нм могут быть использованы в качестве антиотражающих в диапазоне длин волн 500–700 нм и отражающих в диапазоне 400–500 и 700–900 нм. Подбором толщины пленок могут быть получены аналогичные результаты и в других диапазонах длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов С.В. Наноразмерные светопропускающие пленки $In_2O_3(SnO_2)$ с металлическим типом проводимости / С.В. Смирнов, О.Н. Минин, А.А. Чистоедова, А.Е. Петрюк // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 14–18.

2. Гончарова Ю.С. Просветляющие и отражающие наноразмерные покрытия для полупроводниковых источников света // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2-2(22). – С. 203–205.

УДК 538.958

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ И КВАНТАМИ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА ПОРОШКА $BaSO_4$

М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н.;
А.Н. Лапин, с.н.с., к.т.н.; С.А. Юрьев, с.н.с., к.т.н.;
В.В. Каранский, аспирант каф. физики
г. Томск, ТУСУР, лаб. РКМ, membrana2010@mail.ru

Исследовано изменение оптических свойств при последовательном облучении электронами с энергией 30 кэВ и квантами солнечного спектра в диапазоне энергий (0,5–6) эВ модифицированного нано-

частицами SiO_2 порошка $BaSO_4$. Установлено, что облучение приводит к появлению полосы поглощения в видимой области. Отжига дефектов квантами облученного электронами порошка не обнаружено.
Ключевые слова: сульфат бария, диоксид кремния, модифицирование, облучение, электроны, кванты солнечного спектра, спектры отражения.

Сульфат бария обладает большой шириной запрещенной зоны ($E_g \geq 5{,}7$ эВ). Его порошки обладают высокой отражательной способностью. Эти два свойства позволяют получать малое значение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ($a_s \leq 0{,}07$) и использовать их в качестве пигмента терморегулирующих покрытий (ТРП) космических аппаратов, для которых коэффициент a_s является рабочей характеристикой. В последние годы проводятся исследования по изучению оптических свойств, фото- и радиационной стойкости порошков $BaSO_4$, модифицированных наночастицами [1].

На ТРП вместе с квантами солнечного спектра (КСС) действуют другие виды излучений. На высоких орбитах (геостационарной, высокоэллиптической) основными видами излучения являются электроны (e^-), протоны (p^+) и КСС. Они действуют одновременно или последовательно. При этом проявляются синергетические эффекты [3].

Поэтому представляют научный интерес и практическую значимость исследования изменений свойств и рабочих характеристик ТРП под действием характерных видов излучений. Целью настоящей работы является исследование изменений спектров диффузного отражения (ρ_λ) и коэффициента поглощения a_s при последовательном облучении модифицированного наночастицами порошка $BaSO_4$ ($nBaSO_4$) сначала электронами, затем КСС ($e^- \rightarrow$ КСС).

Экспериментальная часть. Исследования выполнены на порошке $BaSO_4$ фирмы NACALAI TESQUE, INC. класса EP (Extra Pure Reagent), модифицированном нанопорошком SiO_2 (3 мас. %) твердотельным способом при 800 ºС ($nBaSO_4$). Регистрацию спектров диффузного отражения (ρ_λ) после каждого периода облучения осуществляли в вакууме на месте облучения образцов (in situ) в имитаторе условий КП «Спектр» [4].

Осуществляли последовательное облучение сначала электронами (E = 30 кэВ, $\Phi \leq 7 \cdot 10^{16}$см$^{-2}$), затем КСС (2 и 4 ч при E_s = 3 эсо, эсо-эквивалент солнечного облучения, равный 0,139 Вт·см$^{-2}$). По спектрам ρ_λ по методике [5] рассчитывали коэффициент поглощения a_s. По значениям коэффициентов до (ρ_o и a_{so}) и после облучения ($\rho_ф$ и $a_{sф}$) рассчитывали их изменение ($\Delta\rho = \rho_o - \rho_ф$) и ($\Delta a_s = a_{sф} - a_{so}$).

Результаты. Из спектров ρ_λ следует, что край основного поглощения модифицированного наночастицами порошка $nBaSO_4$ составляет менее 200 нм, что соответствует ширине запрещенной зоны более 6 эВ (рис. 1). В более длинноволновой области коэффициент отражения (ρ) составляет более 90%, с увеличением длины волны до 2100 нм он незначительно уменьшается. После облучения электронами он уменьшается.

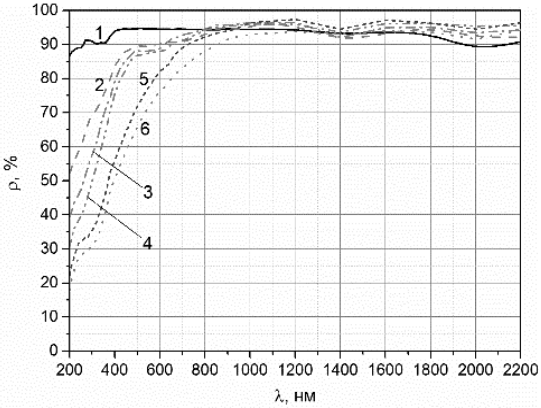


Рис. 1. Спектры ρ_λ до (1) и после облучения модифицированного 3 мас. % наночастиц SiO_2 порошка $BaSO_4$ флюенсом электронов с энергией 30 кэВ и затем квантами солнечного спектра с интенсивностью 3 э.с.о.: $2{,}5\cdot10^{16}$ (*2*); $5\cdot10^{16}$ (*3*); $7\cdot10^{16}$ (*4*); $7\cdot10^{16}$ + 2 ч КСС (*5*); $7\cdot10^{16}$ + 4 ч КСС (*6*)

В спектрах ($\Delta\rho_\lambda$) появляется полоса поглощения при $\lambda < 200$ нм с характерным выступом при 280 нм. Последовательное облучение КСС приводит к резкому увеличению интенсивности полосы (таблица). Значения $\Delta\rho_{280}$ с увеличением флюенса электронов увеличиваются монотонно, последующее действие КСС приводит к увеличению скорости их роста. Для величин Δa_s закономерность другая: в начале облучения электронами изменения небольшие, при флюенсе $7\cdot10^{16}$ регистрируется рост, а последующее действие КСС приводит к резкому увеличению – в 2,5–3,5 раза.

Изменение коэффициента отражения на длине волны 280 нм и коэффициента поглощения a_s порошка $nBaSO_4$ после последовательного облучения электронами и КСС

Последовательное облучение (электроны 30 кэВ → КСС 3 э.с.о.)					
Φ_e, $см^{-2}$ → $t_{КСС}$	$2{,}5\cdot10^{16}$	$5\cdot10^{16}$	$7\cdot10^{16}$	$7\cdot10^{16}$→ 2 ч	$7\cdot10^{16}$ → 4 ч
$\Delta\rho_{280}$	24,8	37,5	46,1	58,1	62,4
Δa_s	0,031	0,033	0,43	0,104	0,149

Действие КСС после электронов приводит только к увеличению интенсивности полосы поглощения и концентрации дефектов.

Выполненные исследования показали:

– последовательное облучение электронами с энергией 30 кэВ и КСС приводит только к уменьшению коэффициента отражения, модифицированного наночастицами порошка $nBaSO_4$;

– отжиг КСС дефектов, образованных электронами при предварительном облучении, не происходит;

– кинетика изменения коэффициента отражения и коэффициента поглощения a_s такова, что действие КСС после электронов приводит к увеличению скорости их роста.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание FEWM-2020-0038.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhailov M.M., Yuryev S.A., Lapi A.N., Lovitskiy A.A. The effects of heating on $BaSO_4$ powders' diffuse reflectance spectra and radiation stability // Dyes and Pigments. – 2019. – No. 163. – P. 420–424.

2. Brown R.R., Fogdall L.B., Cannaday S.S. Elektron-Ultrafiolet radiation effects on thermal control coatings // Progress in astronautics: principlesof spacecraft and entry. – 1969. – Vol. 21. – P. 697–724.

3. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Ya., Dvoretskii M.I. Apparatus for Study of Diffuse-Reflection and Luminescence Spectra of Solids in Vacuum (Article) // Instruments and experimental techniques. – New York. – Vol. 28, Is. 4, pt. 2. – July 1985. – P. 929–932.

4. ASTM E490-00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.

УДК 666.3.017

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВУЮ ПЕРЕСТРОЙКУ ЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ

В. Костенко, аспирант ИШ ФВП

г. Томск, НИ ТПУ, kostenko.lerochka@mail.ru

Научный руководитель С.А. Гынгазов, вед. н.с., д.т.н.

г. Томск, ИШФВП НИ ТПУ

Изучено влияние обработки циркониевой керамики ионами алюминия в непрерывном режиме при плотности тока 0,15 А/см^2 в течение 1 ч. Установлено, что ионная обработка ионами алюминия приводит к частичному спеканию и разрушению порошковых компактов. Наблюдается стравливание поверхности спеченных компактов. Ионная обработка приводит к нарушению стехиометрии по кислороду в керамике.

Ключевые слова: циркониевая керамика, ионная обработка, электропроводимость.

Воздействие пучков ускоренных ионов является одним из развивающихся методов поверхностной обработки [1]. Ионно-лучевая обработка значительно обогащает возможности поверхностной и объемной [2] модификации свойств материалов. Отмечено [1, 2], что ионная обработка способна изменять структурно-фазовое состояние, физико-химические, механические, электрические и магнитные свойства обрабатываемых изделий, не приводя к изменению их геометрических размеров. В результате создаются изделия с требуемыми характеристиками и состоянием поверхности [3].

Цель работы – исследование структурно-фазовой перестройки циркониевой керамики под действием ионной обработки.

Методика эксперимента. Компактирование образцов проводили одноосным изостатическим прессованием из ультрадисперсного порошка (УДП) состава $97ZrO_2–3Y_2O_3$ (моль %). Спекались компакты при атмосферных условиях при температуре 1400°С, время выдержки – 1 ч. Керамические образцы были диаметром 9 мм и толщиной не более 3 мм. Спеченные образцы имели плотность 5,85 г/см^3 и открытую пористость не более 3%.

Ионной обработке подвергались образцы двух типов: А – порошковый компакт; Б – керамические образцы, изготовленные по традиционной керамической технологии. Ионную обработку образцов проводили в объеме рабочей камеры вакуумной установки, содержащей генератор плазмы и систему формирования высокоинтенсивных ионных пучков [4]. В качестве генератора плазмы использован вакуумно-дуговой генератор с аксиально-симметричным магнитным полем. Вакуумно-дуговой разряд с током 150 А генерировал непрерывный поток плазмы алюминия. Максимальная плотность ионного тока составляла 0,15 А/см^2. Время ионной обработки керамических образцов составляло 1 ч.

Исследование структуры поверхности керамики проводилось на растровом электронном микроскопе Hitachi TM-3000. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре ARL X’tra с полупроводниковым Si(Li) детектором Пельтье (монохроматизированное CuK α-излучение, в диапазоне углов 2θ). Дополнительно проводились измерения проводимости керамических образцов в температурном диапазоне от 25 до 300 °С двухзондовым методом сопротивления растекания [5].

Результаты исследования. Ионная обработка образцов типа А. Обработка компакта УДП пучком ионов алюминия приводит к его уплотнению, т.е. наблюдается спекание керамики. Со стороны прямого воздействия ионного пучка наблюдается частичное разрушение

образца и образование трещин, что обусловлено наличием градиентов температуры. Со стороны прямого воздействия пучка наблюдается рост зерн (рис. 1, *а*). В местах, где было только тепловое воздействие (с обратной стороны образцов), размер зерен оставался прежним, характерный для порошка в компакте.

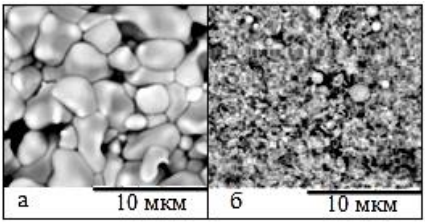


Рис. 1. Поверхность компакта УДП:
а – со стороны воздействия пучка; *б* – с обратной стороны

Ионная обработка образцов типа Б. Ионная обработка спеченных компактов приводит к потемнению образцов, что характерно для циркониевой керамики при обработке в вакууме. Последующий отжиг обработанной керамики при атмосферных условиях при 1000°С в течение 1 ч восстанавливает стехиометрию по кислороду и керамика приобретает первоначальный белый цвет (рис. 2).

Ионная обработка приводит к стравливанию поверхности керамики примерно на 150–200 мкм (рис. 2, *б*). Ионная обработка спеченных образцов не приводит к изменению микроструктуры.

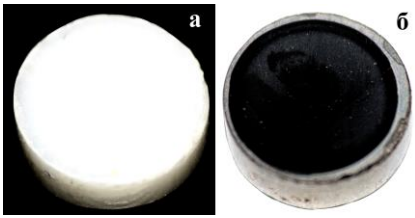


Рис. 2. Внешний вид образцов до (*а*) и после (*б*) ионной обработки

В исходном состоянии (после спекания) и после ионного воздействия керамика содержит тетрагональную фазу. Согласно РФА алюминий в приповерхностном слое образцов находится на уровне примеси, и образование новых фаз не обнаружено. Ионная обработка керамики не вызывает существенного изменения размеров области когерентного рассеяния и микроискажений решетки.

В пределах чувствительности используемой аппаратуры (1 нА) исходные керамические образцы были непроводящими. После ионной

обработки проводимость уверенно фиксировалась. Проводилось два измерения. Результаты измерения проводимости керамики приведены в таблице.

Проводимость керамики после ионной обработки

Номер измерения	Температура измерения, °С	Проводимость, $(Ом \cdot см)^{-1}$	Энергия активации, эВ
1	50	$1{,}27 \cdot 10^{-8}$	4,31
	300	$7{,}43 \cdot 10^{-6}$	
2	70	$3{,}18 \cdot 10^{-9}$	7,02
	300	$7{,}54 \cdot 10^{-6}$	

Как видно из таблицы, повторное измерение сопровождается увеличением энергии активации проводимости, что говорит о протекании процессов окисления. Из этого следует, что почернение керамики и увеличение ее проводимости под действием ионной обработки связано с нарушением стехиометрии по кислороду.

Таким образом, в реализованном режиме обработки ионами алюминия наблюдается частичное спекание и разрушение порошковых компактов, в то время как спеченные образцы претерпевают стравливание поверхности. Ионная обработка не приводит к трансформации фазового состава керамики. Под действием ионной обработки наблюдается нарушение стехиометрии по кислороду, что сопровождается появлением проводимости в обработанной керамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghyngazov S.A. Zirconia ceramics processing by intense electron and ion beams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2018. – Vol. 435. – P. 190–193.

2. Ghyngazov S., Pavlov S., Kostenko V., Surzhikov A. Ion processing of alumina ceramics by high-power pulsed beams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2018. – Vol. 434. – P. 120–123.

3. Ghyngazov S.A., Kostenko V., Ovchinniko V.V., Gushchina N.V., Makhinko F.F. Surface Modification of Corundum Ceramics by Argon Ion Beam // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – Vol. 10. – P. 438–444.

4. Ryabchikov A.I., Ananin P.S., Dektyarev S.V. et. al. High intensity metal ion beam generation // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 447–453.

5. Miroshkin V.P., Panova Ya.I., Passynkov V.V. Dielectric relaxation in polycrystalline ferrites. // Phys. Solid State. – 1981. – Vol. 66. – P. 779–782.

УДК 621.382.2.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕЙ КОМПОНЕНТЫ ТОКА УТЕЧКИ В КНИ-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.А. Лагаев[1,2], аспирант каф. ИЭМС

Научный руководитель Н.А. Шелепин[1,2], проф. каф. ИЭМС, д.т.н.

г. Москва, г. Зеленоград, НИУ «МИЭТ»[1], АО «НИИМЭ»[2]

lagaevdmitriy@gmail.com, nchelepin@niime.ru

С помощью среды приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD на примере *n*-канального КНИ-транзистора исследуются основные пути протекания токов утечки, индуцируемых ионизирующем излучением космического пространства. Показано, что доминирующей компонентой является ток, протекающий вдоль границы скрытого оксида и пленки кремния.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, КНИ КМОПТ, ток утечки.

В настоящее время активно развивается производство интегральных схем (ИС) на основе технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) с повышенной стойкостью к внешним воздействиям. Классическим примером подобного внешнего воздействия является ионизирующее излучение космического пространства, которое приводит к росту величины тока утечки за счет накопления положительного заряда в толстых слоях оксида. Хотя компаниям Honeywell и X-FAB удалось достичь серьезных успехов в области повышения стойкости ИС к ионизирующему излучению космического пространства с помощью технологических приемов [1–3], наиболее широкое распространение при проектировании описываемых ИС получили КНИ-транзисторы со структурой А- и Н-типа [4]. Однако разработка схем космического назначения на КНИ-транзисторах со структурой А- и Н-типа не исключает наличия функциональных и параметрических отказов, являющихся следствием роста тока утечки. В связи с этим выявление доминирующих компонент тока утечки является необходимым условием для эффективного применения методик, направленных на повышение стойкости ИС, предназначенных для бесперебойной работы в условиях ближнего и дальнего космоса.

В представленной работе на примере *n*-канального КНИ-транзистора со структурой А-типа, разработанного в среде приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD и представленного на рис. 1, исследуется влияние накопленного положительного заряда на величину тока утечки. Экстракция тока утечки осуществлялась при

подаче на сток напряжения питания (V_{ds} = 5 В) для заданного диапазона значений плотности поверхностного заряда на границе раздела Si/SiO_2.

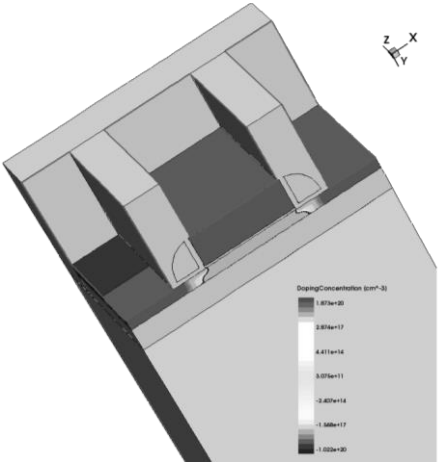


Рис. 1. Вид *n*-канального КНИ-транзистора со структурой А-типа

В таблице представлены результаты приборно-технологического моделирования тока утечки от величины плотности поверхностного заряда для различных границ раздела Si/SiO_2. Отметим, что постоянное снижение проектных норм и использование процессов нитридизации на этапе формирования подзатворного диэлектрика [5] позволяет пренебречь зарядом в подзатворной области. По этой причине случай накопления положительного заряда вблизи границы кремния с подзатворным диэлектриком не рассматривался.

Результаты моделирования тока утечки в зависимости от пространственного распределения заряда и его величины

Ток утечки, А/мкм	Плотность положительного заряда на границе Si/SiO_2, $см^{-2}$				
	1E11	5E11	1E12	2E12	3E12
I_{off} (STI)	8,902E-13	8,983E-13	9,059E-13	9,210E-13	9,360E-13
I_{off} (STI+Spacer)	8,954E-13	9,296E-13	9,957E-13	3,724E-11	1,991E-7
I_{off} (BOX)	9,146E-13	1,194E-12	4,228E-11	2,023E-05	8,731E-05

Анализ результатов показывает, что доминирующей компонентой тока утечки является ток вдоль границы скрытого оксида с активным слоем кремния, что согласуется с работой [6]. Однако из полученных результатов также следует, что узким местом *n*-канальных КНИ-транзисторов также может стать паразитный ток, протекающий вдоль границы щелевой изоляции и под спейсером вблизи

области истока. Таким образом, оптимизация конструкции прибора должна предполагать борьбу как с донной, так и боковой компонентой тока утечки, что достигается за счет оптимизации профиля легирующей примеси в пленке кремния и использования генератора обратного смещения подложки [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Cressler J.D., Mantooth H.A. (ed.). Extreme environment electronics. – CRC Press, 2017.
2. Сайт фирмы X-Fab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.xfab.com/technology/soi/018-um-xt018/ (дата обращения: 15.12.2019).
3. Fernandez-Perez S. et al. Radiation hardness of a 180 nm SOI monolithic active pixel sensor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – Vol. 796. – P. 13–18.
4. Селецкий А.В., Шелепин Н.А. Проектирование и разработка элементов КМОП СБИС, предназначенных для функционирования в условиях воздействия космических ионизирующих излучений // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. – 2016. – № 2. – С. 39–45.
5. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. – 2-е изд. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. – 800 с.
6. Шелепин Н.А. Физические основы моделирования паразитных элементов КНИ КМОП СБИС // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 5. – С. 9– 16.
7. Шелепин Н.А., Мещанов В.Д., Лушников А.С., Рыбалко Е.С. КМОП КНИ интегральная микросхема с повышенной радиационной стойкостью. Патент РФ 2545325.

УДК 628.9

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОДИОДОВ

И.П. Выборнов, студент

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ФЭ, vybornov.ilya.99@gmail.com

Проект ГПО ФЭ-1203 «Спектральные методы анализа тонких диэлектрических плёнок»

Бесконтактным методом измерена температура кристаллов полупроводниковых источников света на основе гетероструктуры GaAs-GaAlAs. Показано, что при рабочем токе, равном 30 мА, перегрев кристалла относительно температуры окружающей среды не превышает 6–7 К.

Ключевые слова: температура кристалла, светодиод, бесконтактный метод.

Целью данной работы является отработка методики измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света на основе гетероструктуры GaAs-GaAlAs.

В настоящее время электропитание светодиодов осуществляется источниками постоянного напряжения. Однако схемы питания постоянным напряжением обладают несколькими недостатками:

а) зависимость тока, протекающего через диод, от напряжения носит экспоненциальный характер, поэтому небольшие изменения управляющего напряжения приводят к серьезным изменениям тока;

б) электрическое сопротивление светодиода зависит от температуры, поэтому любые изменения температуры вызывают сильные изменения протекающего через диод тока [1].

Поэтому предпочтительным является импульсный режим работы светодиодов. Основные плюсы при переходе на импульсный режим работы светодиодов:

1. В импульсном режиме можно достичь высокой мощности во время действия импульсов при малом значении средней мощности прибора.

2. Уменьшается процесс саморазогрева и, следовательно, уменьшается рабочая температура кристалла.

Бесконтактные измерения температуры на постоянном и импульсном токе проводились на светодиоде красного света свечения компании Hongli Opto-electronic. Ниже приведены параметры исследуемого светодиода:

1. Напряжение питания $U_{пит}$ = 2,0–2,2 В.

2. Световой поток F = 40,3–50 лм.

3. Длина волны излучения λ = 635 нм.

4. Прямой ток светодиода I = 30 мА.

В качестве термочувствительного параметра выбрана полуширина спектра излучения светодиода. Для этого было проведено исследование зависимости полуширины пика от температуры путем измерения в термостате в импульсном и непрерывном режимах при одном значении прямого тока. Измерения проводились при длительности импульсов, равной 1 мкс, и периоде импульсов, равном 100 мкс, следовательно, скважность была равна 100. Измерения полуширины пика проводились на спектрометре AvaSpec 204 B в программном обеспечении AvaSoft. На рис. 1 приведен график зависимости полуширины пика от температуры термостата.

Полуширина спектра растет с ростом температуры кристалла, а максимум спектра излучения сдвигается в сторону низких энергий, то есть в длинноволновую область [2, 3].

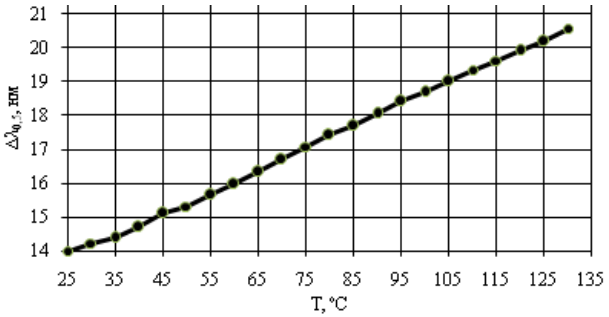


Рис. 1. Зависимость полуширины спектра излучения от температуры термостата

Предполагая, что мощность рассеяния при одном и том же значении прямого тока в импульсном режиме в 100 раз меньше, чем в непрерывном режиме, можно считать, что в импульсном режиме температура кристалла равна температуре термостата.

На рис. 2 представлена временная зависимость полуширины спектра излучения светодиода, иллюстрирующая процесс нагрева.

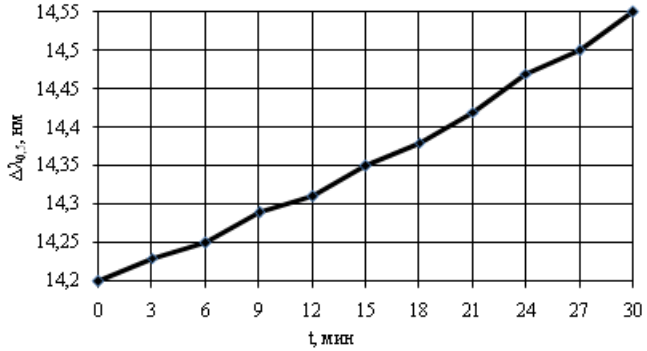


Рис. 2. Зависимость полуширины спектра от времени в непрерывном режиме

Сопоставляя зависимости рис. 1 и 2, можно определить, как растет температура кристалла светодиода в процессе работы. За 30 мин эксперимента в непрерывном режиме температура кристалла изменилась примерно на 6–7 ºС, что хорошо согласуется с рекомендациями фирмы-изготовителя.

Таким образом, метод бесконтактного измерения температуры кристаллов светодиодов при соответствующей доработке и аттестации может быть рекомендован к использованию в производстве светодиодных осветительных устройств и модулей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сушков В.П., Никифоров С.Г. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твёрдых растворов AlGaInN // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Вып. 3. – С. 10–13.
2. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. Гончарова Ю.С. Спектральный метод бесконтактного измерения температуры кристаллов полупроводниковых источников света / Ю.С. Гончарова, М.А. Романова, С.В. Смирнов // Доклады ТУСУР. – 2015. – Т. 2, № 2(36). – С. 38–40.

УДК 621.3.032.269

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭМИССИОННОГО ЭЛЕКТРОДА НА ГЕНЕРАЦИЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ФОРВАКУУМНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Казаков, А.В. Медовник, доценты каф. физики;
Т.Э. Юлдашбаев, студент каф. ЭП
г. Томск, ТУСУР, andrykazakov@gmail.com

Исследовано использование эмиссионного электрода, состоящего из двух сеток с различными геометрическими прозрачностями, обеспечившего увеличение максимального рабочего давления газа форвакуумного плазменного источника импульсного широкоапертурного электронного пучка.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, плазменный источник электронов, форвакуумный диапазон давлений.

Одним из определяющих факторов для эффективного использования импульсного плазменного источника электронов является возможность достижения определенных параметров электронного пучка (таких, как плотность тока, длительность импульса, энергия в импульсе), а также стабильное функционирование источника при этих параметрах. Для источников электронов с плазменным катодом параметры электронного пучка во многом определяются параметрами эмиссионной плазмы, электрической прочностью ускоряющего промежутка, а также процессами, происходящими в области формирования и транспортировки электронного пучка [1, 2]. Использование дугового разряда с катодным пятном для генерации эмиссионной плазмы в форвакуумном импульсном источнике электронов позволило устранить проблему ограничения плотности эмиссионной плазмы и увеличить длительность импульса разряда, что обеспечило увеличение удельных параметров электронного пучка [3, 4].

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния конфигурации сеточного эмиссионного электрода на генерацию им-

пульсного электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений с целью увеличения эффективности эмиссии электронов из плазмы дугового разряда и повышения рабочего давления газа форвакуумного источника электронов.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. В исследованиях использовалась модернизированная электродная система форвакуумного импульсного плазменного источника электронов на основе дугового разряда (рис. 1), более подробное описание данной системы представлено в [3]. По сравнению с исходной (базовой) электродной конструкцией форвакуумного источника электронов на основе дугового разряда, описание которой представлено в [4], в модернизированной электродной системе с целью увеличения поперечного размера электронного пучка были увеличены размеры полого анода (экспандера), а также увеличен диаметр эмиссионного окна. В настоящей работе эмиссионный электрод состоял из двух сеток № 1 и № 2 из нержавеющей стали с различными размерами ячеек и соответственно разными геометрическими прозрачностями. Использование двух сеток обусловлено тем, что при использовании одной эмиссионной сетки максимальное рабочее давление газа (N_2) не превышает 8 Па.

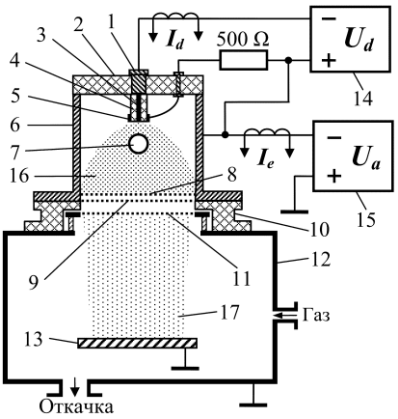


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 – токоввод; *2* – изолятор;
3 – катод; *4* – керамический изолятор;
5 – поджигающий электрод;
6 – анод; *7* – перераспределяющий электрод; *8* – эмиссионная сетка № 1;
9 – эмиссионная сетка № 2;
10 – высоковольтный изолятор;
11 – ускоряющий электрод;
12 – вакуумная камера;
13 – эмиссионная плазма;
14 – электронный пучок;
15 – коллектор; *16* – импульсный блок питания разряда;
17 – источник постоянного ускоряющего напряжения

Плазменный источник электронов размещался на фланце вакуумной камеры, откачиваемой форвакуумным насосом. Давление *p* регулировалось скоростью подачи рабочего газа (N_2) в вакуумную камеру. Питание источника электронов осуществлялось импульсным блоком питания разряда и высоковольтным источником постоянного ускоряющего напряжения. Токи I_d разряда и I_e эмиссии измерялись с помощью трансформаторов тока (чувствительность 20 А/В), а напря-

жение на ускоряющем промежутке U_a – с помощью осциллографического делителя напряжения TESTEC HVP-15.

Результаты экспериментов и их анализ. Использование двух эмиссионных сеток обеспечило увеличение максимального рабочего давления p_{max}, при котором вероятность пробоя ускоряющего промежутка не превышает 5%. При этом, например, уменьшение размеров ячеек эмиссионной сетки № 2, обращенной к ускоряющему электроду, с 0,5×0,5 до 0,3×0,3 мм^2 обеспечивает увеличение p_{max} с 10 до 15 Па (рис. 2). Однако при этом уменьшается эффективность эмиссии электронов ($\eta = I_e/I_d$). Увеличение размеров эмиссионной сетки № 1, расположенной внутри эмиссионного окна в аноде (оптимальное расстояние между сетками № 1 и 2 – d = 2 мм), до 2,5×2,5 мм^2 обеспечивает увеличение эффективности η и сохранение максимального давления p_{max} = 15 Па (рис. 2, *3*). Превышение эффективностью η значения, равного 1 (в пределах 10 %), преимущественно обусловлено вторичной ион-электронной эмиссией, возникающей при бомбардировке эмиссионного сеточного электрода обратным ионным потоком. Подобное увеличение тока эмиссии за счет вторичной ион-электронной эмиссии наблюдается и при меньших давлениях $p = 10^{-2} – 10^{-1}$ Па [5].

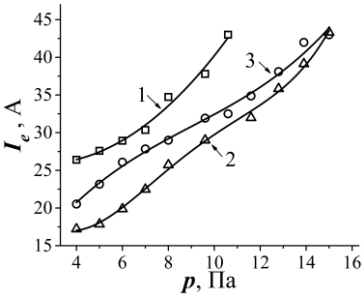


Рис. 2. Зависимость тока I_e от давления газа p (U_a = 9 кВ; τ_d = 3 мс; I_d = 40 А): *1* – сетка № 1 – 1,6×1,6 мм^2, сетка № 2 – 0,5×0,5 мм^2; *2* – сетка № 1 – 2,0×2,0 мм^2, сетка № 2 – 0,3×0,3 мм^2; *3* – сетка № 1 – 2,5×2,5 мм^2, сетка № 2 – 0,3×0,3 мм^2

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-38-20044.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

2. Krasik Y.E. et al. Pulsed plasma electron sources // Physics of Plasmas. – 2009. – Vol. 16, No. 5. – P. 057103.

3. Казаков А.В., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М. Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов на основе дугового разряда // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 6. – С. 50–53.

4. Kazakov A.V., Medovnik A.V., Oks E.M. Formation of pulsed large-radius electron beam in the forevacuum pressure range by a plasma-cathode source based on arc discharge // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1393. – P. 012043.

5. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. Effect of intensified emission during the generation of a submillisecond low-energy electron beam in a plasma-cathode diode // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2009. – Vol. 37, No. 10. – P. 1890–1896.

УДК 537.525

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ВАКУУМА

А.А. Зенин, с.н.с., доцент каф. физики, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, zenin1988@gmail.com

Приведены характеристики и особенности функционирования плазменного источника непрерывного пучка электронов на основе разряда с полым катодом, обеспечивающего при укоряющем напряжении 20 кВ и давлении рабочего газа (гелия) 30 Па генерацию электронного пучка с током более 300 мА.

Ключевые слова: форвакуум, плазма, электронный пучок, пучково-плазменный разряд.

Форвакуумные плазменные источники электронов [1, 2] представляются привлекательными для применения в технологических операциях и процессах электронно-лучевой обработки как металлов, так и диэлектриков, сопровождающихся высоким уровнем газоотделения. Возможности их эффективного использования обусловлены достижимой в электронных источниках такого типа мощностью электронного пучка и ресурсом устройства в экстремальных условиях работы. В настоящий момент форвакуумные плазменные источники электронов, развиваемые на кафедре физики ТУСУРа, достигли мощности порядка 3–4 кВт. Решению задач повышения мощности форвакуумных плазменных источников электронов при приемлемом ресурсе и посвящены исследования, результаты которых приведены в настоящей статье.

Методика эксперимента и обсуждение результатов. Электродная схема форвакуумного плазменного источника электронов представлена на рис. 1. Источником электронов в устройстве служит плазма тлеющего разряда с полым катодом. Благодаря эффекту полого катода удается получить высокую концентрацию эмиссионной плазмы и, следовательно, высокое значение тока пучка и достаточно высокую эффективность извлечения электронов [3]. Электронный источник устанавливается на вакуумную камеру, которая откачивалась механическим насосом BocEdwards до давления 3 Па. Для достижения требуемого рабочего давления (до 30 Па) в камеру напускался гелий.

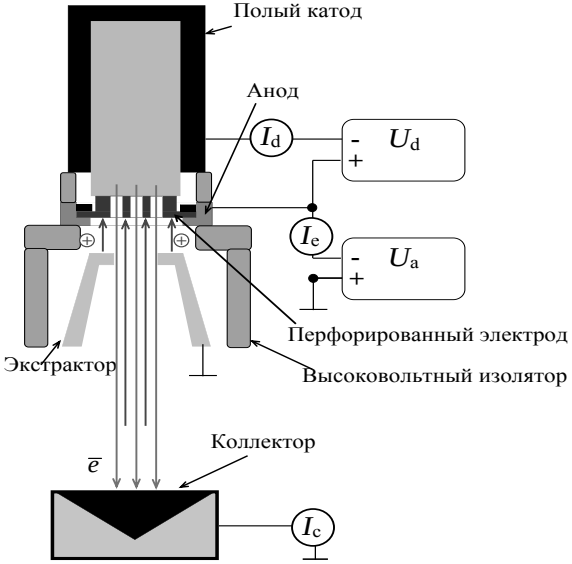


Рис. 1. Электродная схема форвакуумного плазменного источника электронов

Электропитание источника электронов осуществлялось двумя независимыми источниками питания со следующими параметрами: блок электропитания ускоряющего промежутка с напряжением U_a до 20 кВ и током I_e до 800 мА, блок электропитания разрядного промежутка с напряжением U_d до 2 кВ и током разряда I_d до 1500 мА.

Для стабилизации плазменной границы в экспериментах использовался перфорированный электрод из тантала [4]. В результате предварительных экспериментов были найдены оптимальный диаметр отверстия в перфорированном электроде и его толщина. Так, наибольший ток эмиссии и высокая прочность ускоряющего промежутка были получены при диаметре отверстия в перфорированном электроде 1,7 мм и толщине перфорированного электрода 3 мм. Увеличение толщины приводило к снижению тока эмиссии, а увеличение диаметра отверстий наряду с увеличением тока эмиссии приводит к снижению прочности ускоряющего промежутка. На рис. 2 приведены зависимости тока эмиссии и тока коллектора от количества отверстий в перфорированном электроде. Данные зависимости были получены для толщины перфорированного электрода 3 мм и диаметра отверстий 1,7 мм. Из представленных зависимостей видно, что с увеличением количества отверстий в перфорированном электроде, следовательно, и увеличением площади эмиссионной поверхности наблюдается монотонный рост тока эмиссии и тока, регистрируемого на коллекторе.

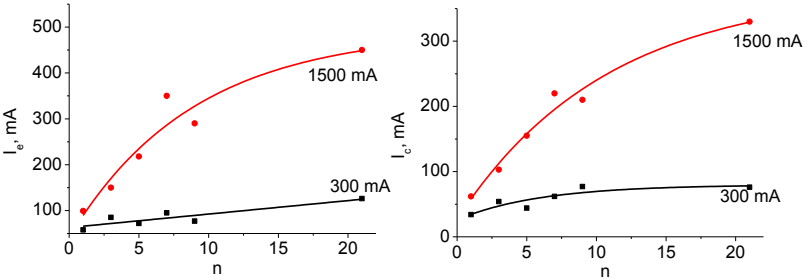


Рис. 2. Зависимость тока эмиссии и тока коллектора от количества отверстий в перфорированном электроде для ускоряющего напряжения 20 кВ и токов разряда 300 и 1500 мА соответственно

Максимальное количество отверстий в 21 связано с геометрическими размерами перфорированного электрода. При увеличении количества отверстий уменьшается толщина стенки между отверстиями, что в конечном результате приводит к локальному перегреву и разрушению решетки. Из представленных зависимостей видно, что максимальный ток эмиссии при 21 отверстии в перфорированном электроде достигает 450 мА, а максимальный ток пучка, регистрируемого на коллекторе, более 300 мА.

Заключение. Повышение мощности электронного пучка в форвакуумном плазменном источнике достигнуто в результате оптимизации геометрии перфорированного электрода. Наибольший ток пучка, регистрированного на коллекторе, был более 300 мА при ускоряющем напряжении 20 кВ и давлении в вакуумной камере 30 Па.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-48-700004 р_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. – М.: Атомиздат, 1977. – 144 с.

2. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

3. Burdovitsin V.A. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources / V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Laser and particle beams. – 2008. – № 26, Iss. 04. – P. 619–635.

4. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

ПОДСЕКЦИЯ 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Михальченко Г.Я.**, директор НИИ ПрЭ, д.т.н., проф.;*
*зам. председателя – **Семёнов В.Д.**, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.*

УДК 621.311.69

ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СХЕМОЙ ДВОЙНОГО НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА

Е.А. Чеботарев, студент; Д.Б. Бородин, электроник каф. ПрЭ
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, chebotarev-egor@mail.ru

Представлены результаты имитационного моделирования схемы источника постоянного тока со схемой двойного накопления заряда.
Ключевые слова: источник тока, корректор коэффициента мощности, накопление заряда, нижний потенциал схемы.

В силовой электронике для улучшения электромагнитной совместимости силовых преобразователей, питающихся от сети переменного тока, применяются различные корректоры коэффициента мощности. Основными недостатками таких преобразователей являются большое число элементов, узкий диапазон работы при изменении входных параметров и проблемы в реализации системы управления.

В [1] представлены схемы семейства преобразователей с пассивным корректором коэффициента мощности и двойным или единичным накоплением заряда. Выбор конкретного преобразователя из упомянутого семейства представляет собой отдельную задачу, решение которой зависит как от технических требований, так и от области применения. В [2] выбрана и исследована одна из схем преобразователя с двойным накоплением заряда относительно нижнего потенциала схемы. Преимуществом данной схемы являются уменьшенные пульсации выходного тока и улучшенные показатели коэффициента мощности. Данная схема представлена на рис. 1.

Имитационное моделирование схемы [2], представленной на рис. 1, показало, что при формировании необходимой выходной мощности значения пульсаций выходного тока и коэффициента мощности не соответствуют параметрам, представленным в таблице.

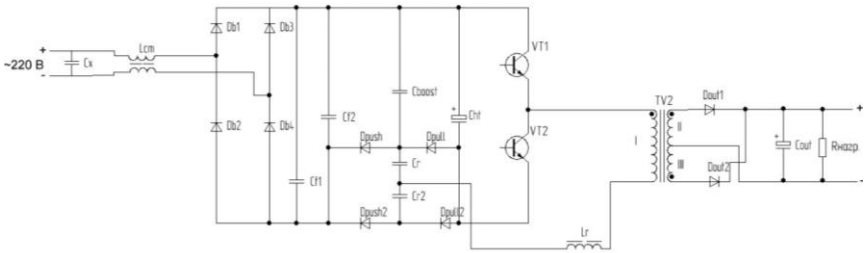


Рис. 1. Схема преобразователя с пассивным ККМ и двойным накоплением заряда относительно нижнего потенциала схемы

Входные и выходные параметры схемы

Параметр	Значение
Входное напряжение $U_{вх}$, В	170…260
Выходное напряжение $U_{вых}$, В	84
Выходной ток $I_{вых}$, мА	750
Выходная мощность $P_{вых}$, Вт	63
Пульсации выходного тока $\Delta I_{вых}$, %	≤0,6
Коэффициент мощности PF	≥0?97

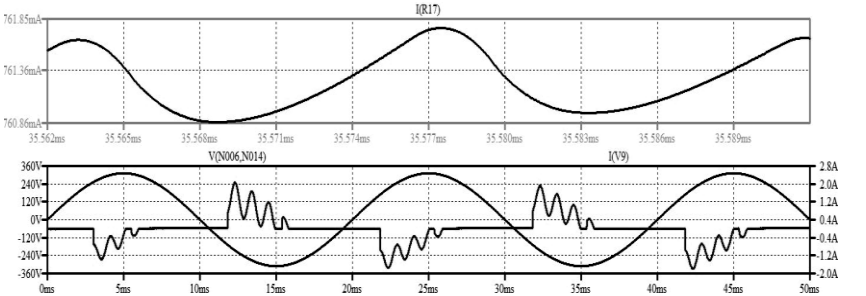


Рис. 2. Диаграммы пульсации выходного тока (сверху) и входного тока и напряжения (снизу) схемы преобразователя с пассивным и двойным накоплением заряда относительно нижнего потенциала схемы

Следующим шагом, по достижению необходимых параметров преобразователя, является исследование комбинированной схемы преобразователя, представленной на рис. 3. Отличительной особенностью данной схемы является использование диодов выпрямительного моста для реализации схемы двойного накопления заряда и уменьшенное количество конденсаторов.

В среде LTSpice IV было проведено имитационное моделирование комбинированного преобразователя с пассивным корректором коэффициента мощности и двойным накоплением заряда.

При построении модели учитывались входные и выходные параметры схемы, которые указаны в таблице. На рис. 4 представлена имитационная модель разработанной схемы, на рис. 5 и 6 – результаты имитационного моделирования.

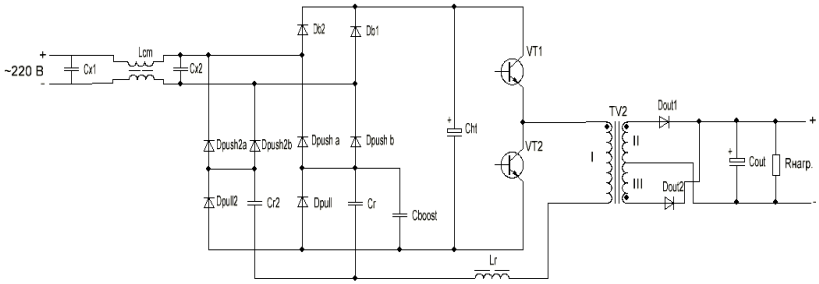


Рис. 3. Комбинированная схема преобразователя с пассивным ККМ и двойным накоплением заряда

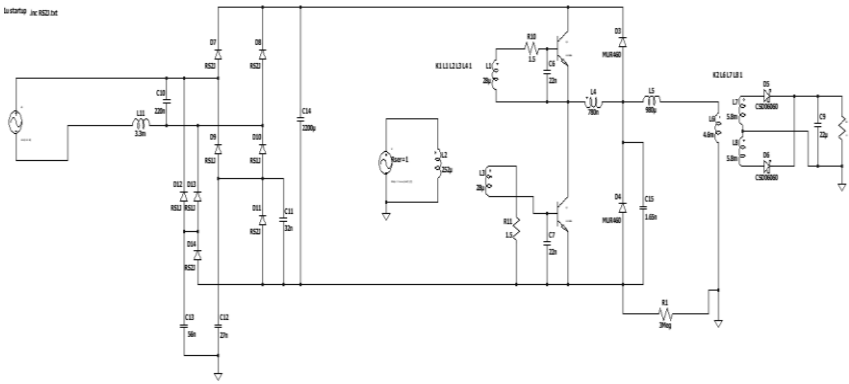


Рис. 4. Имитационная модель комбинированной схемы преобразователя

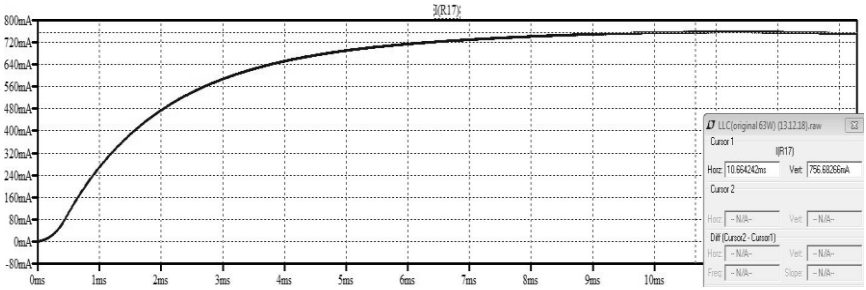


Рис. 5. Выходной ток схемы

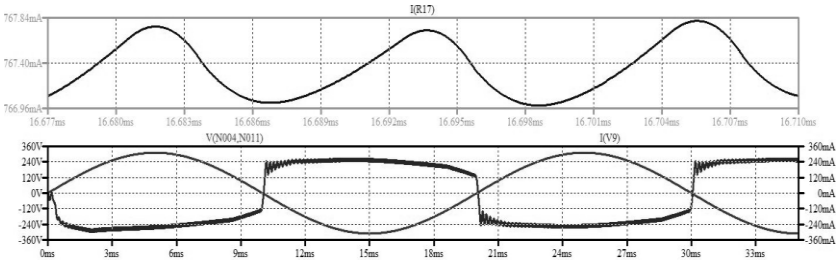


Рис. 6. Диаграммы пульсации выходного тока (сверху) и входного тока и напряжения (снизу) схемы преобразователя с пассивным и двойным накоплением заряда относительно нижнего потенциала схемы

Сравнение результатов имитационного моделирования комбинированной схемы с результатами, полученными в [2], показало, что в комбинированной схеме при достижении необходимой мощности пульсации выходного тока уменьшились с 1,3 до 0,6%, а значение коэффициента мощности увеличилось с 0,95 до 0,98, что удовлетворяет требованиям, представленным в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. RediSem Passive PFC-LED Driver Design Guide. http://redisem.com/index_htm_files/AN2101%20RediSem%20Passive%20PFC%20design%20guide%20Rev03.pdf. (дата обращения: 26.12.2018).

2. Чеботарев Е.А., Бородин Д.Б. Стабилизированный источник питания светодиодных светильников // Научная сессия ТУСУР–2019: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – 340 с.

УДК 621.316.721

ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РЕВЕРСИРОВАНИЕМ ТОКА НАГРУЗКИ

И.Е. Гедзенко, аспирант каф. ПрЭ;

В.А. Кабиров, директор Инжинирингового центра Новгородского гос. ун-та им. Я. Мудрого; В.Д. Семёнов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, gedzenkoie@gmail.com

Рассмотрена работа двухтрансформаторного симметричного мостового преобразователя, работающего в режиме вольтодобавки. Особенностью рассматриваемого преобразователя является возможность реверсирования тока нагрузки.

Ключевые слова: двухтрансформаторный симметричный мостовой преобразователь, вольтодобавочная схема, реверсирование тока нагрузки, двунаправленный преобразователь.

Двухтрансформаторные преобразователи с гальваническим разделением цепей источника питания и нагрузки подробно рассмотрены в [1, 2]. Эти преобразователи находят применение в технике больших токов [2], в источниках питания [1], а также перспективны, на наш взгляд, в зарядных устройствах аккумуляторов. Несомненными преимуществами двухтрансформаторных преобразователей являются высокая конструктивная плотность объёмного заполнения, обеспечиваемая одинаковыми размерами электромагнитных элементов [1], и минимальная габаритная мощность [2] этих элементов. Ещё более уменьшить габаритную мощность электромагнитных элементов можно с помощью применения такого преобразователя в вольтодобавочной схеме. Схемная реализация двухтрансформаторного вольтодобавочного преобразователя (ДТВДТ) в литературе не представлена. В зарядных устройствах необходимо обеспечивать реверсирование тока нагрузки, что позволяет, например, совместить зарядное и разрядное устройство в системах электропитания космических аппаратов и тем самым уменьшить массу и габариты, что особенно важно для указанного применения.

Поэтому тема работы, посвященная разработке и исследованию ДТВДП с возможностью реверсирования тока нагрузки, является актуальной.

Схема ДТВДП представлена на рис. 1.

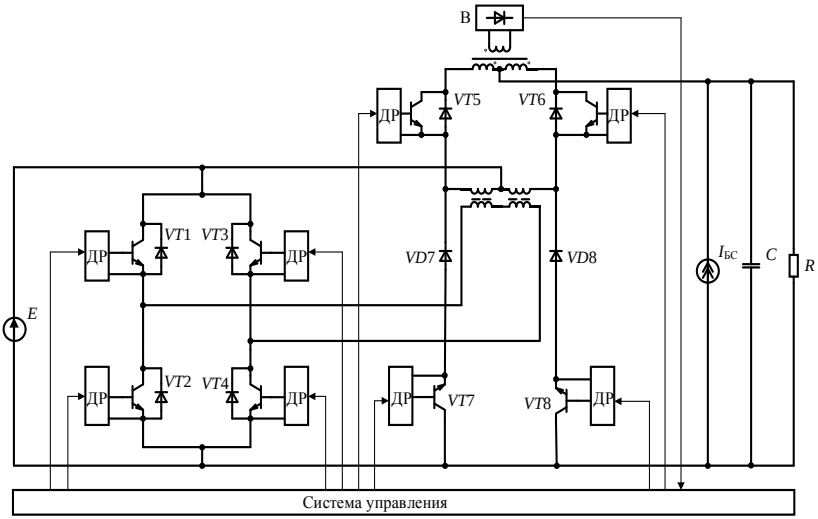


Рис. 1. Схема двухтрансформаторного преобразователя с возможностью реверсирования тока нагрузки

Для обеспечения реверсирования тока нагрузки в схему добавляются два ключа *VT*5, *VT*6, подключенные параллельно выпрямительным диодам *VD*5, *VD*6. Для предотвращения замыкания контура первичной обмотки, работающей в режиме дросселя, через источник питания в схему добавлены ключи *VT*7, *VT*8. Диоды *VD*7, *VD*8 обеспечивают контур протекания тока вторичных обмоток и предотвращают протекание обратного тока через *VT*7, *VT*8. Добавленные элементы не влияют на режим работы преобразователя в прямом направлении. За счёт соединения входного источника напряжения последовательно со средней точкой вторичных обмоток трансформатора образуется вольтодобавочная схема.

Управление ключами *VT*8, *VT*6 происходит синхронно с ключом *VT*4, а ключами *VT*7, *VT*5 – синхронно с *VT*3. Реверс тока в данной схеме обеспечивается за счёт уменьшения напряжения вольтодобавки. Если сумма входного напряжения и напряжения вольтодобавки больше выходного напряжения, то батарея разряжается, обеспечивая питание нагрузки, если меньше – заряжается. Поскольку при таком управлении ток заряда и разряда аккумуляторной батареи ограничен лишь внутренним сопротивлением аккумуляторной батареи, сопротивлением ключей и обмоток, величина фазового сдвига между стойками изменяется в небольшом интервале, даже при большом диапазоне изменения задатчика тока аккумуляторной батареи. Фазовое управление ключами позволяет реализовать мягкую коммутацию [1].

Схема, приведенная на рис. 1, моделировалась в программе Matlab Simulink, в качестве источника напряжения E выступала аккумуляторная батарея. Регулировочная характеристика преобразователя приведена на рис. 2. На ней показана зависимость тока аккумуляторной батареи I от величины управляющего сигнала U, где $I_{\text{РАБ}}$ – максимальный ток разряда аккумуляторной батареи, $I_{\text{ЗАБ}}$ – максимальный ток заряда аккумуляторной батареи. При этом принята следующая договоренность: отрицательное значение тока батареи означает её заряд, положительное – разряд.

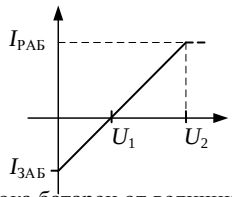


Рис. 2. Зависимость тока батареи от величины задающего сигнала

При имитационном моделировании были приняты следующие параметры преобразователя: напряжение аккумуляторной батареи $E = 60$ В, напряжение на выходной шине 100 В, максимальная мощность нагрузки 1200 Вт. Суммарное сопротивление аккумуляторной батареи, ключей и обмоток составляло 100 мОм. Для моделирования регулировочной характеристики приняты следующие значения: $I_{\text{ЗАБ}} = 4$ А, $I_{\text{РАБ}} = 12$ А, $U_2 = 1.$ Частота переключения составляла 50 кГц. Для линеаризации регулировочной характеристики управляющий сигнал U_1 вычисляется для конкретного значения $I_{\text{ЗАБ}}$. В таблице приведены экспериментальные данные зависимости величины тока аккумуляторной батареи от относительной величины фазового сдвига $\Delta T/T$, % управляющего сигнала инвертора.

Экспериментальные данные

U	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
ΔT, мкс	1,079	1,004	0,908	0,838	0,772	0,701
I, А	–4	–0,8	2,41	5,63	8,78	12
$\Delta T/T$, %	5,395	5,02	4,54	4,19	3,86	3,51

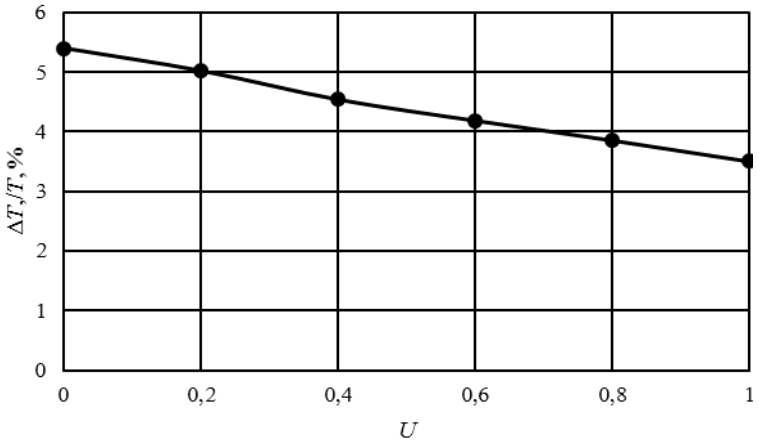


Рис. 3. Зависимость фазового сдвига от величины управляющего сигнала

Вывод. Предложен модифицированный вольтодобавочный вариант двухтрансформаторного преобразователя, который позволяет реверсировать ток нагрузки. В ходе эксперимента определено, что при заданном диапазоне изменения тока от –4 до –12 А и суммарном сопротивлении контура протекания тока аккумуляторной батареи в 100 мОм фазовый сдвиг изменяется на 1,88%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.

2. Винтоняк Н.П. Модульный источник питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока на основе двухтрансформаторного преобразователя: дис. … канд. техн. наук: 05.09.12. – Томск, 2018. – 231 с.

3. Гусев Б.А. Транзисторный двухтрансформаторный мостовой преобразователь постоянного напряжения / Б.А. Гусев, Д.А. Овчинников // Силовая электроника. – 2005. – № 2. – С. 48–52.

УДК 621.319.44

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА УГЛА ПОВОРОТА

Ю.В. Надымова, аспирант; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ; С.Г. Малофиенко, с.н.с. АО «НПЦ «Полюс»

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Julia7@list.ru

Рассмотрен принцип работы дифференциального емкостного датчика угла поворота. Составлена математическая модель емкостного датчика в виде выражения для расчета выходного сигнала в общем виде и для конкретного датчика. Приведена зависимость выходного сигнала от угла поворота вала.

Ключевые слова: дифференциальный емкостный датчик; датчик угла поворота; математическая модель емкостного датчика; амплитудный метод.

Емкостный датчик угла поворота представляет собой конденсатор переменной емкости, зависящей от положения одной пластины конденсатора относительно другой [1, 2]. Одну из обкладок датчика закрепляют на валу контролируемого объекта, а при угловом смещении вала меняется площадь перекрытия пластин и соответственно емкость конденсатора. Изменения емкости преобразуются в переменный электрический сигнал, обрабатываемый электронной схемой.

Для оценки параметров емкостного датчика возникает необходимость в исследовании его выходной характеристики на предмет линейности, поэтому первостепенной задачей для проведения данного исследования становится построение математической модели этого датчика. Для решения данной задачи был использован амплитудный метод измерения выходного сигнала, при котором сравнивается напряжение между двумя точками.

Когда резистивно-емкостный мост (рис. 1) уравновешен, поворотный вал находится в положении 45°, а площади перекрытия пластин, образующих конденсаторы С1 и С2, должны быть равны.

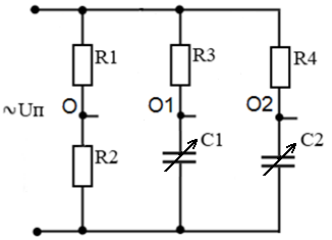


Рис. 1. Электрическая схема емкостного датчика

При повороте вала в ту или другую сторону на угол ±α пластины емкостного датчика смещаются относительно друг друга, что приводит к увеличению одной из емкостей датчика и уменьшению другой. Происходит рассогласование моста, и на выходе датчика появляется сигнал, соответствующий этому углу α.

Математической моделью исследуемого датчика является уравнение для расчета зависимости выходного сигнала от угла поворота, снимаемое между точками О1 и О2.

В общем виде модуль зависимости отношения выходного сигнала датчика к напряжению питания $|U_{\text{вых}}/U_{\text{п}}|_{\text{расч}}$ от угла поворота α будет равен

$$|U_{\text{вых}}/U_{\text{п}}|_{\text{расч}}(\alpha)=\sqrt{\text{Re}^2(\alpha)+\text{Im}^2(\alpha)}\,, \qquad (1)$$

где реальная $\text{Re}(\alpha)$ и мнимая $\text{Im}(\alpha)$ части уравнения равны

$$\begin{cases}\text{Re}(\alpha)=\dfrac{A^2(B^2-C^2)}{(A^2+B^2)(A^2+C^2)};\\ \text{Im}(\alpha)=\dfrac{A(A^2-BC)(B-C)}{(A^2+B^2)(A^2+C^2)}\end{cases}$$

при $$A=\frac{2}{\omega(C_{\max}+C_{\min})};\quad B=\frac{1}{\omega\left[(C_{\max}-C_{\min})\alpha+C_{\min}\right]};$$

$$C=\frac{1}{\omega\left[(C_{\max}-C_{\min})(1-\alpha)+C_{\min}\right]}.$$

В данном уравнении $C_{\max}$ и $C_{\min}$ – максимальное и минимальное значения емкостей С1 и С2, ω – круговая частота колебаний.

Подставив в уравнение (1) конкретные значения емкостей C_{max}, C_{min} и ω, получим выражение для расчета зависимости выходного сигнала от угла поворота для исследуемого датчика:

$$\left|U_{вых} / U_{п}\right|_{расч}(\alpha) = \sqrt{A^2 + B^2},$$

где $$A = \left(\frac{-0,676\alpha + 0,338}{0,782\alpha^4 - 1,56\alpha^3 + 1,17\alpha^2 - 0,391\alpha + 0,454} \right);$$

$$B = \left(\frac{1,49\alpha^3 + 2,241\alpha^2 - 1,12\alpha + 0,186}{1,27\alpha^4 - 2,49\alpha^3 + 1,88\alpha^2 - 0,622\alpha + 0,725} \right).$$

Для удобства расчетов угол поворота вала α, изменяющийся от 0 до 90°, был переведен в относительные единицы, где угол α меняется от 0 до 1 пропорционально изменению угла в градусах.

На рис. 2 представлен график зависимости выходного сигнала от угла поворота $\left|U_{вых} / U_{п}\right|_{расч}(\alpha)$, при α = 0…1 с шагом 0,001.

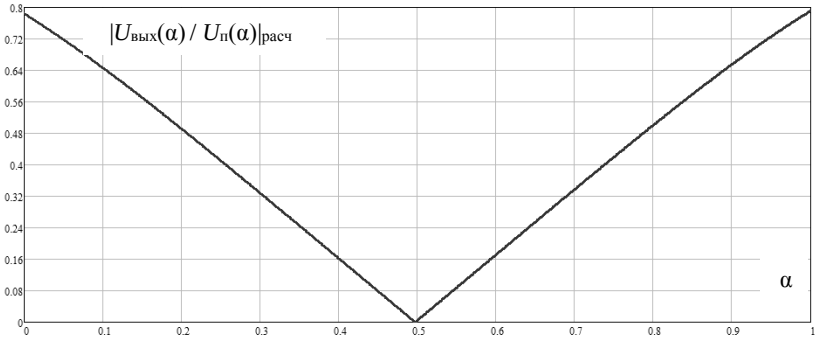


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала $U_{вых} / U_{п}$ от угла поворота α

В результате проведенных расчетов была получена математическая модель дифференциального емкостного датчика угла поворота, позволяющая оценить форму его выходного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения // Библиотека по автоматике. – Вып. 12. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 104 с.

2. Патент РФ № 2017107938, 10.03.2017. Дифференциальный емкостный датчик угла поворота вала// Патент РФ № 173573. 2017. Бюл. № 25 / Малофиенко С.Г., Надымова Ю. В., Подлевский Н.И.

УДК 62-83+621.313.323

ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

А.А.Р. Рахим, аспирант каф. ИШЭ

Научный руководитель Н.С. Кладиев, доцент каф. ИШЭ, к.т.н.

г. Томск, НИ ТПУ, aritomsk@yahoo.com

Представлены результаты управления синхронного двигателя с постоянными магнитами на основе метода непрерывного набора управления с прогнозирующей моделью (CS-MPC). По сравнению с методом конечного набора управления с прогнозирующей моделью (FS-MPC) CS-MPC может значительно снизить пульсацию крутящего момента, но не уступает динамическим характеристикам первого. Кроме того, модель CS-MPC устойчива к изменениям параметров и может успешно отделить независимые параметры управления. Анализ полученных результатов показывает, что при использовании CS-MPC точность управления переменными состояния частотно-регулируемого электропривода выше.

Ключевые слова: прогнозирующее управление, синхронный двигатель, ШИМ-моделирование.

В схеме CS-MPC существует эффективный алгоритм решения функции качества. Для каждой итерации рассматривается набор векторов напряжения, и каждый вектор напряжения зависит от предыдущего субоптимального вектора.

Функция показателя качества выбрана для контроля токов статора (момента и потокосцепления), выбранная в CS-MPC, такая же, как и в FS-MPC. В CS-MPC существует дополнительная защита от перегрузки по току:

$$\begin{cases} j = \left| i_d^{\text{ref}} - i_d^p \right| + G_T \cdot \left| i_q^{\text{ref}} - i_q^p \right| + G_T \cdot I; \\ G_T I = \begin{cases} 0, \text{ если } i_s < I_{s.\max}, \\ \infty, \text{ в других случаях}, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где i_s – ток статора, где i_{dq}^{ref} – опорный ток статора; i_{dq}^p – ток статора, G_T – весовой коэффициент. Не существует стандарта для выбора G_T [1]. В этой статье G_T выбран равным i_q/i_d, чтобы придать активным и реактивным составляющим тока статора одинаковую приоритетность, где i_q и i_d – реактивные составляющие тока статора, которые отвечают за магнитный поток и активные составляющие тока статора, формирующие электромагнитный момент соответственно.

На рис. 1 показана блок-схема предложенного алгоритма решения функции качества [2]. Значение L определяет разрешение сигнала

контролируемого напряжения. Для промышленного применения уместно выбрать L в пределах от 12 до 16. Это означает, что разрешение сигнала напряжения составляет от 12 до 16 бит. Значение i определяет разрешение поиска фазы вектора напряжения на каждой итерации. Соответственно, j определяет разрешение поиска амплитуды вектора напряжения на каждой итерации.

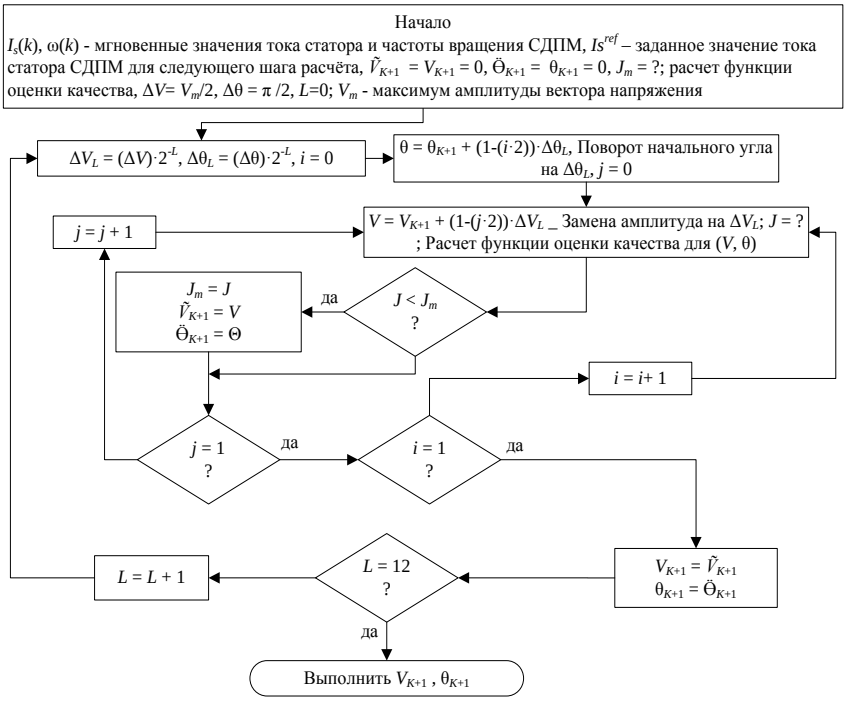


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нелинейного управления с прогнозирующей моделью и с непрерывным поиском вектора управления СДПМ

После установки начальных параметров и получения измеренных значений алгоритм запускается в начале каждого интервала выборки. Во-первых, процедура итерации начинается с выбора начального вектора напряжения, амплитуда которого равна ($V_m/2 = U_m/2$), а фаза равна ($\theta = \pi/2$). Затем его амплитуда и фаза изменяются так, что алгоритм может сходиться к подходящему кандидату на вектор напряжения, который минимизирует функции качества. Фаза и амплитуда вектора напряжения по методу «золотого сечения» меняются на каждой итерации в отдельном внутреннем контуре.

При моделировании частота переключения ШИМ составляет 10 кГц для CS-MPC; СДПМ запускается с шагом скорости 500 об/мин, затем крутящий момент 5 Нм дается при 0,06 с. Сравнение производительности между CS-MPC и FS-MPC показано на рис. 2. В FS-MPC частота дискретизации выходного сигнала переключения составляет 20 кГц, чтобы ограничить частоту переключения. Очевидно, что производительность управления CS-MPC эффективнее, чем у FS-MPC.

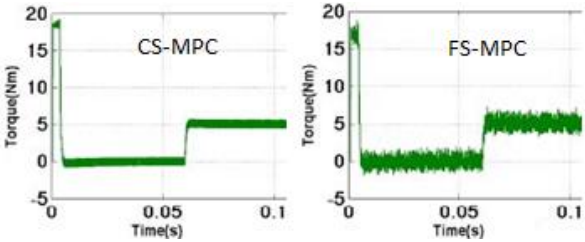


Рис. 2. Сравнение производительности между CS-MPC и FS-MPC для приводов СДПМ с частотой переключения 10 кГц

В предложенной модели прогнозирующего управления CS-MPC для СДПМ нами использован эффективный алгоритм оптимизации функции качества, который способен генерировать непрерывный вектор напряжения. Эти векторы напряжения могут подаваться инвертором с помощью модуля ШИМ. Следовательно, CS-MPC может значительно снизить пульсацию тока и крутящего момента. В CS-MPC легко включить нелинейность и ограничения системы управления, чтобы обеспечить превосходные динамические характеристики привода СДПМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rodriguez J., Pontt J., Silva C.A., Correa P., Lezana P., Cortes P., Ammann U. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter // IEEE Trans. on Ind. Electr. – 2007. – P. 495–503.

2. Saeidi and Kennel R. A novel algorithm for model predictive control of AC electrical drives. in Proc. EDPC. – 2012. – P. 78–84.

УДК 621.314

ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МЯГКОЙ КОММУТАЦИЕЙ СИЛОВОГО КЛЮЧА И КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

А.А. Дубина, А.Е. Грезева, студентки;
П.А. Стрельников, аспирант каф. ПрЭ
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф., к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, nastya05_99@mail.ru

Описан обратноходовой преобразователь с мягкой коммутацией силового ключа, рассмотрены шесть временных интервалов работы преобразователя. Выведена регулировочная характеристика.
Ключевые слова: обратноходовой преобразователь, снаббер без рассеяния энергии, мягкая коммутация, коррекция коэффициента мощности.

Повышение выходной мощности и КПД обратноходовых преобразователей (ОХП) неразрывно связано, в частности, с учетом индуктивности рассеяния трансформатора (ИРТ) и энергии, запасенной в ней. Привычные для такого преобразования мощности (менее 100 Вт) легко достигаются с использованием уже ставшими классикой вариантами RCD-снабберов. Импульсное перенапряжение при размыкании силового ключа в этом случае ограничивается за счет сброса энергии, запасенной в ИРТ, в снабберную емкость. При дальнейшей работе преобразователя эта энергия выделяется в виде тепловых потерь на сопротивлении снаббера. Увеличение выходной мощности ОХП приводит к росту указанной энергии и уже более существенным потерям, которые становится затруднительно рассеивать на сопротивлении, особенно если габариты устройства ограничены.

Обыкновенно это означает, что ОХП для такой мощности уже неприменим и его не рассматривают по формальному ограничению указанной выходной мощности 100 Вт.

Вместе с тем структура ОХП, которая по сути представляет собой самый простой вариант накопления энергии в дросселе и последующую передачу ее в нагрузку, если и имеет ограничение по мощности, то на более высоком уровне. Такой преобразователь с применением токового режима работы ШИМ-модулятора, обеспечивающего нечувствительность к перепадам напряжения питающей сети и высокое быстродействие при коммутации нагрузки, а также с использованием ККМ-контроллеров и помехоподавляющих фильтров, позволит путем замены лишь одной микросхемы ШИМ-контроллера получить простой преобразователь ОХП с коррекцией коэффициента мощности.

В этой работе показывается, как с известной схемой снаббера [1] в комплексе с предлагаемыми соотношениями для учета ИРТ и методикой расчета элементов снаббера можно существенно расширить допустимый диапазон выходных мощностей и одновременно с этим повысить КПД обратноходовых преобразователей.

Рассмотрим схему обратноходового преобразователя со снаббером без рассеяния энергии (рис. 1), приведенную в [1]. Далее будет проведен анализ работы преобразователя и представлены результаты моделирования и экспериментальных исследований. Для анализа работы преобразователя примем следующие допущения:

– пульсации входного и выходного напряжения отсутствуют;

– преобразователь работает в граничном режиме;

– все ключи и диоды – идеальные.

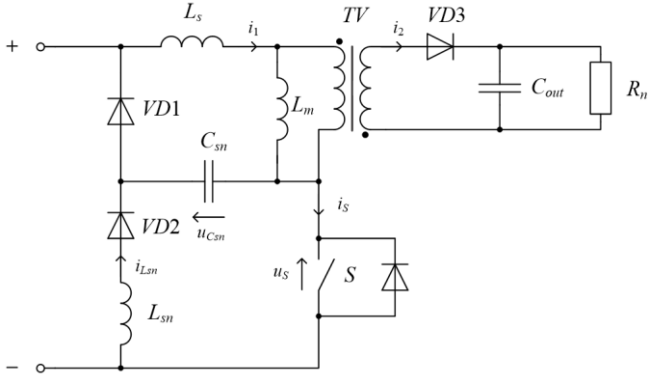


Рис. 1. Обратноходовой преобразователь со снаббером без рассеяния энергии

Анализ работы ОХП со снаббером без рассеяния энергии. Как и всякий импульсный преобразователь, представленный преобразователь в ходе работы из-за переключения управляемых и неуправляемых вентилей изменяет свою схему (структуру), что приводит к смене контуров протекания тока. В установившемся режиме работы преобразователя можно выделить шесть различных временных интервалов, связанных с состояниями вентильного комплекта преобразователя.

Состояния полупроводниковых компонентов для каждого интервала приведены в таблице. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя на каждом интервале одного периода переключений, показаны на рис. 2.

Интервал 1 (t_0–t_1). На этом интервале времени открыты ключ S и диод $VD2$. Конденсатор C_{sn} и дроссель L_{sn} образуют резонансный контур. В процессе перезарядки конденсатор C_{sn} передает энергию в L_{sn}.

В конце интервала большая часть энергии, ранее накопленной в конденсаторе, обратно возвращается в конденсатор, а другая часть остается в дросселе и на следующем интервале рекуперируется в сеть. В индуктивности намагничивания L_m запасается энергия от источника входного напряжения, ток i_1 линейно нарастает. Окончание интервала определяется перезарядом C_{sn} до питающего напряжения $U_{пит}$ и отпиранием диода *VD*1.

Состояния полупроводниковых компонентов

Компонент	Интервал					
	1	2	3	4	5	6
S	вкл.	вкл.	вкл.	выкл.	выкл.	выкл.
VD1	выкл.	вкл.	выкл.	вкл.	вкл.	выкл.
VD2	вкл.	вкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.
VD3	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	вкл.	вкл.

Интервал 2 (t_1–t_2). На этом интервале времени открыты ключ *S* и диоды *VD*1 и *VD*2. Энергия, накопленная в L_{sn}, сбрасывается в источник постоянного напряжения $U_{пит}$. В индуктивности намагничивания L_m продолжает запасаться энергия от источника входного напряжения, ток i_1 линейно нарастает. Окончание интервала наступает при полном размагничивании индуктивности L_{sn} (спадании тока в индуктивности L_{sn} до нуля) и запирании диодов *VD*1, *VD*2.

Интервал 3 (t_2–t_3). На этом интервале времени диоды *VD*1 и *VD*2 выключены, открыт ключ *S*. Этот интервал времени аналогичен включенному состоянию типового обратноходового преобразователя. В индуктивности намагничивания L_m продолжает запасаться энергия от источника входного напряжения, ток i_1 линейно нарастает. Окончание интервала определяется размыканием ключа S по сигналу выключения от системы управления преобразователем согласно закону управления.

Интервал 4 (t_3–t_4). Для наглядности этот интервал был специально увеличен на временной диаграмме. На этом интервале времени ключ *S* выключен, диод *VD*1 открыт. В начальный момент времени t_3 заряженный конденсатор становится источником и передает энергию в индуктивности L_s и L_m до тех пор, пока напряжение на нем не станет равным нулю. Затем индуктивности L_s и L_m передают энергию обратно конденсатору до тех пор, пока напряжение на индуктивности L_m не станет равным выходному напряжению, приведенному к виткам первичной обмотки. В этот момент времени откроется диод VD3 и наступит окончание интервала.

Интервал 5 (t_4–t_5) На этом интервале диод *VD*3 открыт. Энергия, накопленная в индуктивности намагничивания L_m, передается в кон-

денсатор C_{out} и сопротивление нагрузки R_n. Поскольку напряжение на L_m при открывании диода $VD3$ равно выходному напряжению, приведенному к виткам первичной обмотки, то часть энергии из L_m передается конденсатору C_{sn}, при этом энергия из L_s также передается конденсатору C_{sn}. Окончание интервала связано с полным размагничиванием L_s (спаданием тока i_1 до нуля) и запиранием $VD1$.

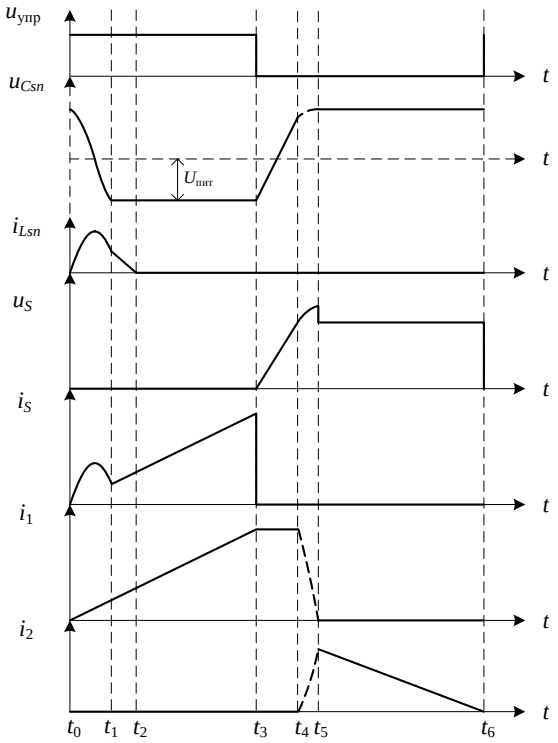


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие работу преобразователя со снаббером без рассеяния энергии

Интервал 6 (t_5–t_6). На этом интервале открыт только диод $VD3$. Энергия, накопленная в индуктивности намагничивания L_m, передается в конденсатор C_{out} и сопротивление нагрузки R_n. Окончание данного интервала в принятом граничном режиме работы связано с полным размагничиванием L_m и запиранием диода VD3.

Количественная оценка длительности интервалов 1–6 связана с формированием дифференциальных уравнений, описывающих протекающие электромагнитные процессы в схеме, которые ввиду гро-

моздкости не приведены, а будут представлены в материалах по развитию данной статьи. Кроме того, эти количественные оценки зависят от требований, которые предъявляются к снабберу. В первую очередь, это требование по ограничению коммутационного броска напряжения на силовом ключе на заданном уровне. Вторым требованием является максимальная частота преобразования, связанная преимущественно с возможностями элементной базы. Оба требования являются факторами, которые непосредственно будут влиять на длительности каждого из интервалов.

Ввиду того, что первый фактор будет устремлять частоту преобразования вверх, с одновременным уменьшением накапливаемой в L_s энергии, а второй фактор, в противовес первому, будет ограничивать рост частоты, становится возможным определить условие – форму некоторого оптимума, который может быть связан, к примеру, с КПД. В сущности, на балансе этих противоположно действующих факторов и будет находиться искомое решение. Разумеется, указанный оптимум может иметь иную форму наполнения, связанную, например, с массой, стоимостью, спектром эмиссии кондуктивных радиопомех и т.п.

Математический анализ системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы, происходящие в представленном ОХП на каждом из интервалов, проведенный авторами, позволяет получить следующие практически значимые соотношения.

Регулировочная характеристика преобразователя:

$$U_{\text{вых}}(\gamma) = \frac{U_{\text{пит}}(1-\lambda)\gamma}{k_{\text{тр}}(1-k-\gamma)}, \qquad (1)$$

где k – коэффициент, характеризующий относительную длительность интервала времени $k = \frac{t_4 - t_3}{T}$; $\lambda = \frac{L_s}{L_s + L_m}$ – коэффициент, характеризующий соотношение ИРТ и индуктивности намагничивания трансформатора.

Коэффициент k может быть рассчитан по формуле (2):

$$k = C_{sn} \frac{U_{\text{пит}} + \frac{U_{\text{вых}} \cdot k_{\text{тр}}}{1-\lambda}}{I_{1\max} \cdot T}, \qquad (2)$$

где $I_{1\max}$ – максимальное значение тока, протекающего через первичную обмотку трансформатора.

Расчёт коэффициента k непосредственно связан с величиной снабберной емкости C_{sn}, определение которой, в свою очередь, должно производиться исходя из требуемого ограничения броска напряжения на ключе S обратноходового преобразователя при его размыкании.

С помощью ШИМ-контроллера, работающего в токовом режиме, можно осуществить коррекцию коэффициента мощности обратноходового преобразователя. Ток первичной обмотки трансформатора при этом будет использоваться в качестве задающего пилообразного сигнала. Перемножив задание по току с синусоидой питающей сети, мы получим потребляемый ток с огибающей синусоидальной формы с высокочастотной составляющей, которую можно убрать с помощью помехоподавляющего фильтра.

Выводы. В ходе работы выделены шесть различных временных интервалов работы ОХП со снаббером без рассеяния энергии, на каждом из которых структура преобразователя не изменяется. Определены соотношения для нахождения длительностей этих интервалов. Найдены аналитические выражения для переменных состояния на каждом интервале. К достоинствам предлагаемого преобразователя относятся его простота, наличие гальванической развязки, снижение динамических потерь силового ключа и возможность осуществления коррекции коэффициента мощности. Определена регулировочная характеристика, учитывающая влияние ИРТ на работу преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adel Alganidi. A Comparison between Different Snubbers for Flyback Converters. – 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ir.lib.uwo.ca/etd/5153 (дата обращения: 16.04.2020).

УДК 53.096

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

И.М. Васильев, аспирант каф. ПМЭ;
А.И. Солдатов, доцент каф. ПМЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vasiliev_ivan91@mail.ru

Описана установка для определения качества нанесения термоинтерфейса в автоматическом режиме. Данная установка позволяет проводить проверки качества нанесения термоинтерфейса при серийном и полусерийном производстве.

Ключевые слова: термоЭДС, эффект Зеебека, тепловое сопротивление, термоинтерфейс**,** теплопередача.

Потери, генерируемые полупроводниковыми кристаллами в процессе работы, приводят к повышению их температуры, снижению производительности и надежности работы системы. Чтобы исключить перегрев, применяют радиатор. Эффективность теплообмена между

электронным компонентом и радиатором зависит от качества сопрягаемых поверхностей, которые имеют неровности и шероховатость. Поэтому в зоне сопряжения образуются воздушные полости, препятствующие прямой передаче тепла. Для улучшения теплопередачи полупроводниковый элемент крепится к радиатору через слой теплопроводящего компаунда для уменьшения теплового сопротивления, что позволяет поддерживать температурный режим полупроводникового элемента в допустимых пределах и сохранить его ресурс [1, 3].

Для оценки качества нанесения термоинтерфейса была разработана установка (рис. 1), основанная на эффекте Зеебека. В месте соединения полупроводникового прибора и радиатора возникнет термоЭДС, по величине которой можно судить о тепловом сопротивлении [2, 4].

Структурная схема установки представлена на рис. 1.

При исследовании теплового сопротивления полупроводниковый прибор с радиатором охлаждения помещается в емкость (*7*) с жидкостью (*11*), постоянно нагреваемую управляемым источником тепла (*12*) до температуры 100 °С. Важным условием является то, что в жидкость помещается только радиатор охлаждения.

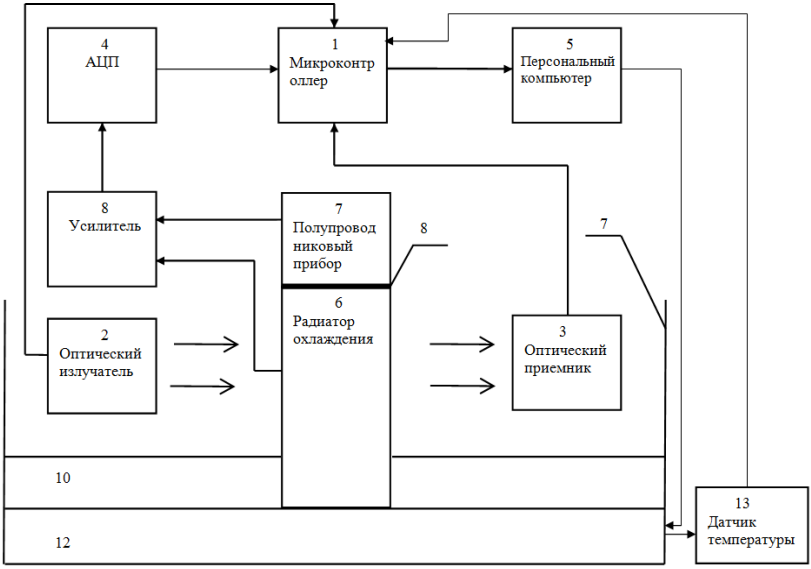


Рис. 1. Структурная схема установки для автоматического измерения теплового сопротивления «корпус–радиатор»

При нагреве радиатора часть тепла будет передаваться через слой теплопроводящего компаунда (*8*) на корпус прибора, создавая при этом термоЭДС, которая считывается, передается в персональный компьютер и определяет среднее значение теплового сопротивления корпус–радиатор. В установке источником тепла (*12*) является лабораторная электрическая плитка с регулятором температуры. В качестве датчика температуры (*13*) используется термопара, которая измеряет температуру жидкости. Радиатор с полупроводниковым прибором закреплены на алюминиевой планке, установленной на валу шагового двигателя. После команды старт, поданной через компьютер, двигатель начинает перемещать планку вниз до тех пор, пока на приемник (*3*) не придёт сигнал с оптического датчика о погружении радиатора в воду. После этого с частотой 3 Гц осуществляется запись термоЭДС, возникающей между радиатором и корпусом полупроводникового прибора, мультиметром Rigol DM3068, соединенным с персональным компьютером и управляемым последним с помощью программного обеспечения PC UltraSensor. После нагрева радиатора в течение 2 мин программа вычисляет значение теплового сопротивления в каждый момент времени.

Для удобства пользователя в конце измерения выводится среднее арифметическое значение теплового сопротивления. Интерфейс оператора представлен на рис. 2.

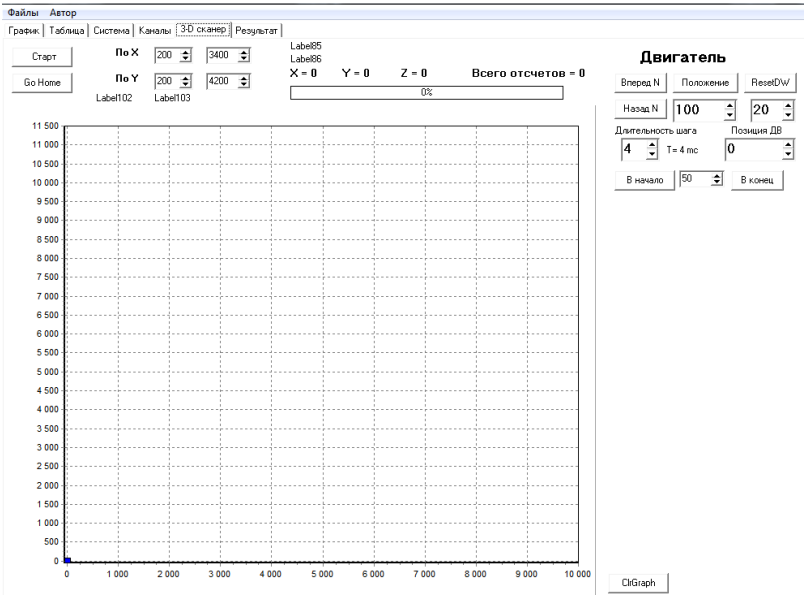


Рис. 2. Закладка визуального контроля термоЭДС

Представленная установка позволяет определить качество нанесения теплопроводящего компаунда без применения датчиков температуры, что положительно влияет на полное время измерения с учётом затрат времени на монтаж этих датчиков и позволяет внедрить этот метод контроля на серийном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С. Влияние перегрева *p–n*-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 2. – С. 256–258.

2. Лидер И.А., Худоногов В.П., Гейман В.Н. Контроль тепловых параметров полупроводниковых приборов с использованием переходных тепловых характеристик // Решетневские чтения. – 2012. – Т. 1. – 320 с.

3. Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Кудрик Я.Я. Исследование перегрева *p–n*-перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавиннопролетных диодов // Современные проблемы физики полупроводников. НУКУС. – 2011. – С. 13.

4. Abouellail A.A., Obach I.I., Soldatov A.A., Soldatov A. I. Surface inspection problems in thermoelectric testing // MATEC. Web-Conf. – 2017. – Vol. 102. ID 01001.

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 621.372.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ИЗМЕНЕННОГО ПРИ ИНДУЦИРОВАНИИ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ

А.Д. Безпалый, аспирант каф. СВЧиКР
Научный руководитель А.Е. Мандель, д.ф.-м.н., проф. каф. СВЧиКР
г. Томск, ТУСУР, id_alex@list.ru

Представлены результаты исследования профиля показателя преломления, измененного при индуцировании канальных волноводов в поверхностном слое кристалла ниобата лития под действием плотно фокусированного лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Исследования профиля индуцированных изменений показателя преломления проводились при помощи интерферометра Жамена с последующим вычислением фазового сдвига на интерферограммах, зарегистрированных ПЗС-камерой.
Ключевые слова: оптическое индуцирование, канальный волновод, ниобат лития, лазерное излучение, поточечный метод, фоторефрактивный эффект, показатель преломления, интерферометр Жамена, фазовый сдвиг.

Создание и развитие полупроводниковых источников света привело к возникновению таких областей науки и техники, как оптоэлектроника, интегральная оптика, волоконная оптика и нанофотоника [1]. В связи с этим стали появляться компактные устройства, размещенные на одной подложке для управления и обработки оптических сигналов, такие как оптические ответвители, сплиттеры, переключатели, модуляторы, дифракционные решетки и другие устройства [1–3]. Одним из материалов, наиболее часто используемых в качестве подложки для таких устройств, является ниобат лития ($LiNbO_3$) [1–3]. Кристаллы ниобата лития широко распространены благодаря уникально-

му набору физических, акусто- и электрооптических свойств, которые очень важны для работы фотонных устройств [2, 3]. Для соединения источников светового излучения с устройствами, размещенными на одной подложке, необходимо формировать элементы, локализующие световые поля. Роль таких элементов могут выполнять канальные волноводы [1–3]. Канальные волноводы можно формировать различными методами: диффузей титана, ионной имплантацией, протонным замещением, лазерной направленной записью и т.д. [2–4]. Благодаря фоторефрактивному эффекту (ФЭ), позволяющему изменять показатель преломления под воздействием света, можно создавать канальные волноводы как в объеме, так и внутри поверхностного слоя кристалла ниобата лития, легированного различными примесями: железом (Fe), медью (Cu), марганцем (Mn) и т.д. [2–4]. Одной из наиболее важных характеристик канальных волноводов является профиль показателя преломления, который влияет на распространение световых полей внутри канала [1].

Целью данной работы является исследование профилей изменений показателя преломления, индуцированных при формировании канальных волноводов в поверхностном слое кристалла ниобата лития под воздействием плотно фокусированного лазерного излучения.

Формирование канальных волноводных структур. Канальные волноводные структуры формировались в подложке $LiNbO_3$ X-среза с размерами 1×10×14 мм^3 по осям *X, Y, Z*. Поверхностный слой образца легирован ионами Cu методом термической диффузии при температуре 900ºC. Толщина поверхностного слоя составила ~300 мкм. В качестве источника излучения использовался твердотельный YAG: Nd^{3+} лазер с удвоением частоты (λ = 532 нм), работающий в непрерывном режиме. Лазерный луч световой мощностью 10 мВт фокусировался на поверхность кристалла с помощью микрообъектива с 10-кратным увеличением. Поляризация света соответствовала обыкновенной волне $LiNbO_3$. Экспонированные участки представляли собой прямые полосы с пониженным показателем преломления, ориентированные вдоль оси *Y* кристалла. Эти полосы состояли из нескольких точек, индуцированных фокусированным световым пучком диаметром 40 мкм по уровню 0,1 максимальной интенсивности. Продолжительность воздействия одним световым пятном на кристалл варьировалась от 2 до 40 с.

Исследование изменений показателя преломления и его профиля при формировании канальных волноводов. Исследование величины изменений показателя преломления Δn и его профиля в поверхностном слое $LiNbO_3$ при поточечном индуцировании канальных

волноводных структур проводилось с использованием интерферометра Жамена. После формирования областей, индуцированных при разном времени экспонирования, экспериментальный образец помещался в одно из плеч интерферометра. Источником света в интерферометре являлся He-Ne лазер с длиной волны λ = 633 нм. Световая поляризация лазера соответствовала необыкновенной волне кристалла. Сигнал с выхода интерферометра передавался на ПЗС-камеру сферической линзой. Интерференционная картина регистрировалась после размещения экспериментального образца в одном из плеч интерферометра.

Величина изменений показателя преломления Δn варьировалась в зависимости от длительности экспонирования поверхности кристалла и определялась путем анализа интерферограмм. Профиль измененного показателя преломления в индуцированных областях выстраивался по оценкам фазового сдвига вдоль осей Y и Z кристалла из формулы [2, 5]:

$$\Delta n(y,z) = \frac{\lambda \cdot \Delta\varphi(y,z)}{2\pi \cdot d}, \qquad (1)$$

где λ – длина волны источника света интерферометра; $\Delta\varphi(y, z)$ – фазовый сдвиг интерференционных полос в зависимости от осей Y и Z образца; d – толщина поверхностного слоя.

Полученные результаты показали, что профиль измененного показателя преломления имеет различные характер и величину в зависимости от времени воздействия лазерного излучения. Помимо того, что показатель преломления уменьшается в центре освещенной области, на краях этой области величина Δn увеличивается вдоль оси Z с каждой стороны. Стало также известно, что возможно регулировать величину увеличенного показателя преломления внутри волноводной области, изменяя расстояние между двумя экспонированными полосками.

Заключение. Результаты исследований показали, что поточечное индуцирование позволяет варьировать значение и влиять на профиль изменения показателя преломления при формировании канальных волноводов. Данная информация необходима при проектировании элементов управления светом и их систем в фотонных устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bahaa E.A. Saleh, Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics // Wiley Series in Pure and Applied Optics. – 1991. 947 p.

2. Petrov M.P., Stepanov S.I., Khomenko A.V. Photorefractive Crystals in Coherent Optical Systems // Springer Series in Optical Sciences. – 2013. – 277 p.

3. Bazzan M., Sada C. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications // Appl. Phys. Rev. – 2015. – Vol. 2, No. 4. – P. 1–25.

4. Vittadello L., Zaltron A., Argiolas N. et al. Photorefractive direct laser writing // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol. 49, No. 12. – P. 1–9.

5. Zhao J.-L., Zhang P., Zhou J.-B. et al. Visualizations of Light-induced Refractive Index Changes in Photorefractive Crystals Employing Digital Holography // Chin. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 20, No. 10. – P. 1748–1751.

УДК 535.015

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАЮЩИХ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР

Д.И. Дудник, студент

Научный руководитель С.Н. Шарангович, зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, drinza10@gmail.com

Получена математическая модель дифракции расходящихся световых пучков на пропускающих многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах (МНГДС) с учетом неоднородности амплитудного профиля первой гармоники показателя преломления. Представлены аналитические выражения для матриц перехода неоднородных слоев МНГДС на основе фотополимерных материалов.

Ключевые слова: многослойные голографические дифракционные структуры, матричные передаточные функции, фотополимерный материал.

Многослойные неоднородные голографические дифракционные структуры (МНГДС) представляют собой набор слоев из неоднородных решеток, сформированных голографическим способом в поглощающих фотополимерных материалах (ФПМ), разделенных оптически однородными промежуточными слоями.

Целью данной работы является разработка аналитической модели взаимодействия световых пучков с неоднородной многослойной голографической дифракционной структурой, которая описывает угловые спектры и пространственные распределения дифракционного поля с использованием формализма передаточных функций.

В данной работе рассматривается процесс считывания МНГДС произвольно поляризованным квазимонохроматическим световым пучком в пренебрежении остаточным поглощением ФПМ $E^0(\mathbf{r},t)$. Геометрия дифракции на МНГДС представлена на рис. 1. E^0 – падающий (считывающий пучок). E_0^n, E_1^n – прошедший и дифрагировавший в первый порядок пучки.

Распределение дифрагирующих пучков на выходе *n*-го слоя МНГДС зависит от распределения дифрагирующих пучков на выходе предыдущего слоя.

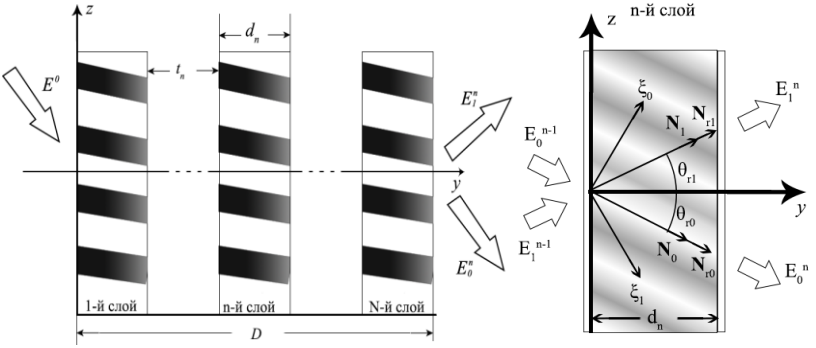


Рис. 1. Схема дифракции: на МНГДС (*а*); на *n*-слое МНГДС (*б*)

Для определения дифракционного светового поля на выходе МНГДС, состоящей из N ГДС на основе ФПМ, которые разделены N–1 промежуточными слоями A, воспользуемся матричным методом описания преобразования плоских световых волн в многослойных средах [1,2]. Взаимодействие световых полей 0-го и 1-го дифракционных порядков в n-м слое МНГДС толщиной d_n представляется в виде

$$\mathbf{E}^n = \mathbf{T}^n \times \mathbf{E}'^{n-1}, \qquad (1)$$

где введены обозначения:

$$\mathbf{E}^n = \begin{bmatrix} E_0^n(\omega,\theta) \\ E_1^n(\omega,\theta) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}'^{n-1} = \begin{bmatrix} E_0'^{n-1}(\omega,\theta) \\ E_1'^{n}(\omega,\theta) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}^n = \begin{bmatrix} T_{00}^n(\omega,\theta) & T_{10}^n(\omega,\theta) \\ T_{01}^n(\omega,\theta) & T_{11}^n(\omega,\theta) \end{bmatrix}.$$

Здесь $\mathbf{T}^n$ – матричная передаточная функция (матрица перехода) n-го слоя МНГДС; $E_i'^{n-1}(\omega,\theta)$, $E_i^n(\omega,\theta)$ – частотно-угловые спектры (ЧУС) на входе и выходе n-го слоя.

Компоненты матрицы перехода $\mathbf{T}^n$ определяются выражениями:

$$T_{00}(\omega,\theta) = 1 - \frac{b_0^{m2}}{2} A \int_{-1}^{+1} \exp\left[i \frac{\Delta K^m d_n}{2} (1-q) \right] \times$$

$$\times \sinh\left[\frac{cs(1+q)}{2} \right] \cdot {}_2\mathrm{F}_1(1-\alpha, 1+\alpha; 2; w)\, dq;$$

$$T_{01}(\omega,\theta)=-i\frac{b_0^m}{2}\sqrt{\frac{\nu_1}{\nu_0}}\int_{-1}^{+1}\exp\left[-i\frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q)\right]\times$$

$$\times\cosh^{-1}\left[c(s(1-q)/2-t)\right]\cdot {}_2\mathrm{F}_1(-\alpha,\alpha,1;w)\,dq;$$

$$T_{10}(\omega,\theta)=-i\frac{b_1^m}{2}\sqrt{\frac{\nu_0}{\nu_1}}\int_{-1}^{+1}\exp\left[-i\frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q)\right]\times$$

$$\times\cosh^{-1}\left[c(s(1-q)/2-t)\right]\cdot {}_2F_1(-\alpha,\alpha,1;w)\,dq;$$

$$T_{11}(\omega,\theta)=1-\frac{b_1^{m2}}{2}A\int_{-1}^{+1}\exp\left[i\frac{\Delta K^m d_n}{2}(1-q)\right]\times$$

$$\times\sinh\left[\frac{cs(1+q)}{2}\right]\cdot {}_2\mathrm{F}_1(1-\alpha,1+\alpha;2;w)\,dq,$$

где все параметры определены в [3].

Следует отметить, что в частном случае взаимодействия плоских волн в МНГДС на основе ГДС с однородными профилями $n_1(y)$, компоненты T_{ij} матрицы перехода $\mathbf{T}^n$ переходят в известные [4].

В МНГДС промежуточный слой толщиной t_n (см. рис. 1, *а*) дает фазовый набег, и если считать, что показатель преломления промежуточного слоя равен показателю преломления голограммы, то матрица перехода $\mathbf{A}^n$ для такого слоя будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{A}^n=\begin{bmatrix}\exp(-i(\mathbf{k}_1^n\cdot\mathbf{y}_0)t_n & 0\\ 0 & \exp(-i(\mathbf{k}_0^n\cdot\mathbf{y}_0)t_n\end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Перемножив матрицы перехода всех слоев, можно получить связь между входным полем $\mathbf{E}_0$ и дифракционным полем $\mathbf{E}^N$ на выходе МНГДС толщиной D:

$$\mathbf{E}^N=\mathbf{T}\times\mathbf{E}_0, \qquad (3)$$

где $\mathbf{T}=\mathbf{T}^N\times A^{N-1}\times\mathbf{T}^{N-1}\times\ldots\mathbf{A}^n\times\mathbf{T}^n\times\ldots\times\mathbf{A}^1\times\mathbf{T}^1$ – матричная передаточная функция (матрица перехода) всей МНГДС; $D=\sum_{n=1}^{N}d_n+\sum_{n=1}^{N-1}t_n$, $\mathbf{E}_0=\begin{bmatrix}E_0(\omega,\theta)\\ 0\end{bmatrix}$, $E_0(\omega,\theta)$ – ЧУС падающего на МНГДС светового пучка.

Таким образом, в работе представлена аналитическая модель взаимодействия световых пучков с МНГДС, которая описывает преобра-

зование угловых спектров и пространственных распределений дифракционного поля в дальней зоне с использованием формализма матричных передаточных функций. Полученные решения позволяют рассчитать поляризационные и дифракционные характеристики МНГДС, состоящей из разделенных промежуточными слоями объемных неоднородных пропускающих голограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарангович С.Н. Трехмерная брэгговская дифракция квазихроматических световых пучков на амплитудно-неоднородном акустическом поле в анизотропной среде // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 5. – С. 1121–1122.

2. Пен Е.Ф. Свойства многослойных неоднородных голографических структур / Е.Ф. Пен, М.Ю. Родионов // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 10. – С. 919–924.

3. Ноздреватых Б.Ф. Дифракционные характеристики пропускающих неоднородных фотонных структур в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах / Б.Ф. Ноздреватых, С.В. Устюжанин, С.Н. Шарангович // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 8(1). – С. 109–117.

4. Nordin, G.P. Photopolymer-based stratified volume holographic optical elements / G.P. Nordin, A.R. Tanguay // Optics Letters. – 1992. – Vol. 17, No. 23. – P. 1709–1711.

УДК 535.215.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ СВЕТОВОГО ПУЧКА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

М.Н. Гаппарова, Д.К. Романенко, А.В. Щукин, студенты;
А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР
Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. СВЧиКР, maftuna.gapparova@gmail.com
Проект ГПО СВЧиКР-1807 «Разработка метода формирования и создание фотонных волноводных схем на основе сегнетоэлектрических кристаллов ниобата лития»

Приведена теоретическая модель температурной зависимости дифракционной расходимости светового пучка в кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта.
Ключевые слова: ниобат лития, фоторефрактивный эффект, пироэлектрический эффект, дифракционная расходимость, самофокусировка.

Распространение лазерных световых пучков в нелинейно-оптических кристаллах сопровождается эффектами дифракционной расходимости, которые можно скомпенсировать [1] за счет изменения температуры образца. При нагревании кристалла на его поверхности накапливаются заряды, формирующие поле пространственного заряда, обусловленное пироэлектрическим эффектом.

Целью данной работы является исследование температурной зависимости дифракционной расходимости светового пучка в кристалле ниобата лития с учетом вклада пироэлектрического эффекта.

В работе рассмотрено распространение узкого когерентного светового пучка, распространяющегося перпендикулярно оптической оси кристалла ниобата лития, что соответствовало необыкновенной волне.

Для описания распространения светового поля через кристалл ниобата лития было использовано выражение

$$E = A(x,z)\exp(ikz - iwt), \tag{1}$$

где $k = k_0 n_e$ – волновое число в среде, n_e – необыкновенный показатель преломления, $A(x, z)$ – огибающая лазерного пучка. В параксиальном приближении $A(x, z)$ определяется как [2]

$$\left(i\frac{\partial}{\partial z} - \frac{1}{2k}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\frac{k}{n_e}\Delta n \right) A(x,z) = \frac{ik}{n_e}\Delta n(E)A(x,z), \tag{2}$$

где Δn – изменение показателя преломления среды.

Изменение показателя преломления определяется как [2]:

$$\Delta n(E) = -\frac{1}{2}n_e^3 r_{ij} E_{sc}, \tag{3}$$

где E_{sc} – поле пространственного заряда в среде, r_{ij} – электрооптический коэффициент.

Учет вклада пироэлектрического эффекта приводит к тому, что поле E_{sc} будет включать в себя две составляющие, одна из которых представляет собой поле пространственного заряда E_{phsc} [2], формируемое за счет проявления фоторефрактивного эффекта, а другая – поле пространственного заряда E_{pysc} [3] обусловленное пироэлектрическим эффектом:

$$E_{sc} \approx -E_{ph}\frac{I}{I + I_d} + E_{py}\frac{\sigma I}{I_d}, \tag{4}$$

где I – интенсивность лазерного пучка, I_d – темновая интенсивность, E_{ph} – фотовольтаическое поле, E_{py} – пироэлектрическое поле.

В случае фотовольтаического механизма транспорта электрических зарядов величина наведенного поля пространственного заряда определяется соотношением

$$E_{ph} = \frac{\left|\overline{\delta_{phv}}\right|}{\sigma}, \tag{5}$$

где δ_{phv} – плотность фотовольтаического тока, σ – проводимость кристалла.

$$\left|\overline{\delta_{phv}}\right| = G\alpha I, \tag{6}$$

где G – постоянная Гласса, α – оптическое поглощение.

Пироэлектрическое поле, возникающее при изменении температуры, определяется соотношением [4]

$$E_{py} = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} p\Delta T, \tag{7}$$

где $p = \frac{\partial P_s}{\Delta T}$ – пироэлектрический коэффициент, P_s спонтанная поляризация, ΔT – изменение температуры, ε_0 – диэлектрическая проницаемость в вакууме, ε_r – диэлектрическая проницаемость материала.

Компенсация дифракционных искажений лазерных световых пучков может приводить к возникновению солитонного режима [4]. Тогда в случае рассмотрения формирования светлого пространственного оптического солитона выражение (2) будет имеет следующее решение [5]:

$$A(x,z) = \sqrt{r}\, U(s) exp(i\mu\xi), \tag{8}$$

где $r = \frac{I_{\max}}{I_d}$ – отношение максимальной плотности мощности света к плотности темнового излучения, $I_{\max}$ – максимальная интенсивность пучка, I_d – это темная интенсивность излучения, которое определяется как отношение коэффициента термической генерации электронов (B) и s – сечение фотоионизации.

При постановке выражений (4) и (3) в (2) с учетом решения (8) получим [6]

$$i\frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial s} + \beta|U|^3 + \frac{\gamma|U|^3}{1+|U|^2} = 0. \tag{9}$$

Решение дифференциального уравнения (9), будет описывать распределение интенсивности с учетом полей E_{py} и E_{ph} [4].

По выражению (5) было рассчитано значение поля пространственного заряда, обусловленное фоторефрактивным эффектом при I = 190 Вт/см^2, λ = 532 нм, n_e = 2,2. По выражению (7) было рассчитано значение поля пространственного заряда, обусловленное пироэлектрическим эффектом, при изменении температуры от 1 до 60 °С. Подстановка значений полей позволяет рассчитать соответствующие коэффициенты β и γ в выражении (9) и построить зависимость ширины пучка при изменении температуры.

На рис. 1 приведена зависимость изменения ширины узкого линейно поляризованного лазерного пучка (d = 10 мкм) при его распространении в кристалле ниобата лития длиной 1 см от температуры нагрева образца.

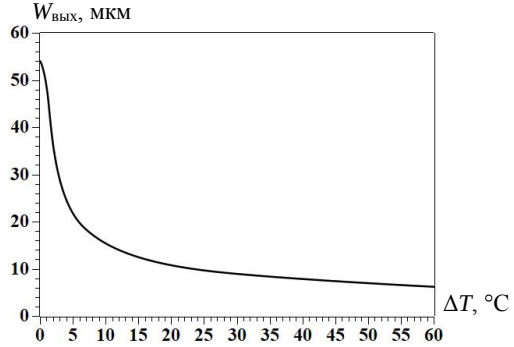


Рис. 1. График изменения ширины пучка ($W_{вых}$) от изменения температуры ΔT при I = 190 Вт/см^2, λ = 532 нм, n_e = 2,2, E_{ph} = 5,7·10^6 В/м, E_{py} = (1,5·10^4÷1,5·10^6) В/м

Интенсивность излучения составляла I = 190 Вт/см^2, E_{ph} = 5,7·10^6 В/м, E_{py} = (1,5·10^4÷1,5·10^6) В/м. Поляризация световой волны соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Из графика видно, что дифракционная расходимость светового пучка уменьшается при увеличении температуры кристалла, что обусловливается вкладом пироэлектрического поля E_{py}. При изменении температуры на 25 ºС дифракционная расходимость лазерного пучка полностью компенсируется, и его диаметр становится равным диаметру пучка на входной грани кристалла. При этом расчетное значение пироэлектрического поля E_{py} = 3,7·10^5 В/м. Дальнейшее повышение температуры приводит к самофокусировке светового пучка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романенко Д.К., Сокольников А.В., Гаппарова М.Н. Исследование дифракционной расходимости лазерных пучков в кристалле ниобата лития с учётом вклада пироэлектрического эффекта // Сб. избранных статей научной сессии ТУСУРа. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – 207 с.

2. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. – СПб.: Наука, 1992. – С. 300–320.

3. Buse K, Pankrath R. Pyroelectrically induced photorefractive effect in: $Sr_{0.61}$ $Ba_{0.39}Nb_2O_6$: Ce // Optics Letters. – 1994. – Vol. 19, No. 4. – P. 260–262.

4. Jassem Safioui, Fabrice Devaux and Mathieu Chauvet. Pyroliton: pyroelectric spatial soliton // Optics Express. – 2009. – Vol. 17, № 24. – P. 209–216.

5. Segev M. Steady-State Spatial Screening Solitons in Photorefractive Materials with External Applied Field // Physical review letters. – 1994. – Vol. 73. – P. 3211–3214.

6. Qichang Jiang, Yanli Su, Xuanmang Ji. Pyroelectric photovoltaic spatial solitons in unbiased photorefractive crystals // Netherlands: Physics Letters A. – 2012. – Vol. 34(35). – P. 385–387.

УДК 535.31:519.254

ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ

Т.Л. Григорян, магистрант каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.О. Семкин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tigrangrigoryan2016@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования полиномиального регрессионного анализа для минимизации погрешности измерения дальности триангуляционными лазерными дальномерами.

Ключевые слова: триангуляционный дальномер, opencv, python, регрессионный анализ, полином, numpy.

Бесконтактный лазерный метод измерения координат является одним из самых широко используемых методов создания дальномеров в настоящее время.

Рассматриваемый в данной статье метод лазерной триангуляции используется во многих промышленных приложениях и является хорошо зарекомендовавшим себя методом реализации лазерных дальномеров ввиду простоты конструкции и высочайшей точности. Триангуляционные дальномеры используют визуальный анализ внешнего положения взвешенного центра лазерного пятна в качестве опоры для измерения расстояния.

Однако нелинейность параметров, возникающая из принципа измерения, серьёзно ограничивает точность дальномеров и увеличивает сложность калибровки. К примеру, авторы работы [1] предлагают использовать управление наведением лазерного пятна для коррекции параметров измерения дальномера. Авторы работы [2] предлагают использовать метод крутого восхождения (метод Бокса–Уилсона) для учета нелинейности триангуляционных дальномеров.

Целью данной работы является экспериментальное исследование полиномиального регрессионного анализа в качестве метода минимизации погрешности измерения дальности триангуляционных дальномеров.

Для реализации дальномера был выбран метод захвата светового пятна в кадре, т.к. он наиболее прост. Каждый раз, когда камера захватывает кадр, программное обеспечение выделяет в нем световое пятно и отфильтровывает шумы. Для обнаружения светового пятна лазера использовалась открытая библиотека OpenCV, программа для расчетов параметров и регрессии была реализована на языке программирования Python.

Для измерения расстояния прежде всего дальномер должен быть откалиброван. Для данной работы была принята реализация калибровки по методу «точка–точка», поскольку она обеспечивает наилучшую точность, т.е. наиболее оптимальна.

Суть метода «точка–точка» заключается в том, что измеряемый образец помещается на определенные заранее известные расстояния и фиксируется пиксельное положение центра лазерного пятна на анализируемом изображении.

Полученные значения в точках калибровки (рис. 1) были подвергнуты различным видам регрессионного анализа. Также для каждого вида регрессионного анализа были оценены коэффициенты детерминации, корреляции и средняя ошибка аппроксимации

На рис. 1 показаны графики аппроксимирующей кривой при различных порядках моделируемого полинома.

Также было произведено сравнение полиномиального регрессионного анализа с другими видами регрессии, и исходя из анализа коэффициентов приведенной погрешности был сделан вывод, что наиболее оптимален (высокие коэффициенты детерминации и низкие значения средней ошибки аппроксимации) полиномиальный регрессионный анализ 5-го порядка.

Графически из рис. 1 можно сделать вывод, что с повышением степени полинома значительно снижается возможность регрессионного анализа предсказывать результат измерений вне калибровочных значений, следовательно, регрессионный анализ при высоких степе-

нях полинома (при степенях полинома, близких к количеству калибровочных значений) не имеет практического значения (не способен корректно прогнозировать результат).

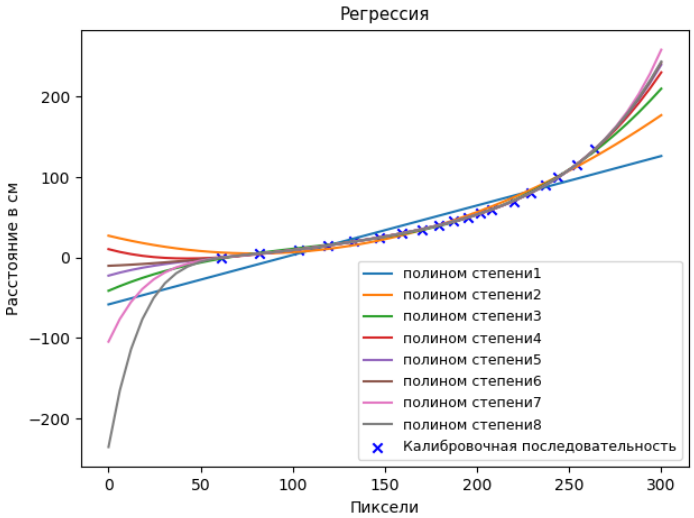


Рис. 1. График аппроксимирующей кривой при различных степенях полинома

С помощью теоретической модели и экспериментальных данных в таблице показаны результаты измерения для полиномиальной регрессии 5-й степени.

Измеренные дальности и погрешности (в скобках приведены параметры по порядку (коэффициент детерминации в % и средняя ошибка аппроксимации в %)

Номер изм.	Коэф. (99,994%, 0,631%)	Эталонное значение дальности	Абсолютная погрешность, см	Приведенная погрешность, %
1	76,698	77	0,302	0,22
2	32,865	33	0,135	0,1
3	7,3512	7	0,3512	0,26
4	42,385	42	0,385	0,28
5	107,227	107	0,227	0,16
6	148,0232*	150*	1,9768*	1,46*
7	–6,947*	–6*	0,947*	0,70*

* – значение находится вне шкалы измерения.

Таким образом, исходя из данных таблицы и рис. 1, можно сделать вывод, что несмотря на наличие более высоких степеней поли-

нома, регрессионный анализ при 5-й степени обладает лучшими параметрами прогнозирования и минимизирует погрешность измерения. Классическая геометрическая модель интерпретации показывает кратно более высокие значения погрешностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang H. et al. Laser triangulation displacement measurement method Using prism-based optical structure // IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. – 2008. – Automation and Mechatronics. – 2008. – P. 956–90.

2. Chensong Dong, A regression model for analysing the non-linearity of laser triangulation probes// International Journal of Advanced Manufacturing. – 2011. – P. 5–8.

УДК 535.331

ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ КТР

К.В. Короткова, аспирант каф. ФЭ;
К.П. Мельник, инженер ООО «Кристалл-Т»
Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, klavdiya_95k@mail.ru

Исследовано отражение и пропускание кристаллов КТР в видимой и УФ-области спектра при воздействии засветки излучением лазера длиной волны 532 нм и белого светодиода. Обнаружена трансформация спектров отражения в диапазоне 200–300 нм.

Ключевые слова: калийтитанилфосфат (КТР), фотоиндуцированные явления, оптическое отражение и пропускание.

Калийтитанилфосфат ($KTiOPO_4$) – нелинейный оптический кристалл, который обладает нелинейными оптическими, электрооптическими и акустооптическими свойствами. Он востребован для различных нелинейных и волноводных применений. Структура кристаллов КТР представляет собой трехмерный каркас, образованный из связанных, чередующихся титан-кислородных октаэдров TiO_6 и фосфор-кислородных тетраэдров PO_4, а в каналах между каркасами размещаются катионы калия [1, 2]. Высокое содержание в кристалле ионов Ti^{4+} обусловливает формирование необходимых оптических свойств, но также известно, что ионы титана обладают высокими фотокаталитическими свойствами. При воздействии на кристалл фотонов с энергией 2–3 эВ возникает возможность переноса заряда от кислорода в титан-кислородных октаэдрах на вакантные уровни титана, появление у титана избыточных 3d – раствор-расплавной кристаллизации производства ООО «Кристалл-Т» [2].

Перед экспериментом исследуемые образцы были подвержены отжигу в воздушной атмосфере при температуре 170 °С. Каждый кристалл делился на две одинаковые части, одна часть использовалась в качестве теста, а вторая подвергалась обработке. Кристаллы облучались лазерным излучением 532 нм и плотностью мощности 100 мВт/см^2 и одноваттным белым светодиодом с плотностью мощности 200 мВт/см^2 с различной экспозицией.

Спектры отражения и пропускания были получены с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-2700. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2.

Из рисунков следует, что независимо от вида излучения наблюдается рост коэффициента отражения при увеличении времени экспозиции. На основе полученных значений коэффициента отражения возможно вычислить методом Крамерса–Кронига и показатели преломления и поглощения.

Заключение. Полученные результаты подтверждают наличие фотоиндуцированного поглощения кристаллов КТР в ультрафиолетовой области спектра. Величина коэффициента отражения может быть использована для контроля дефектности и качества обработки поверхности кристаллов.

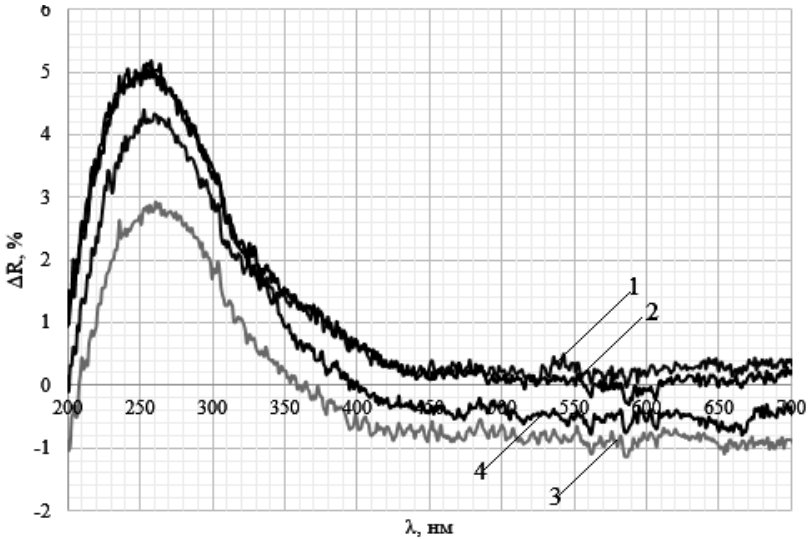


Рис. 1. Разностный коэффициент отражения кристалла КТР при облучении зеленым лазером (532 нм, 120 мВт) после облучения: *1* – 10 мин; *2* – 30 мин; *3* – 60 мин; *4* – 120 мин

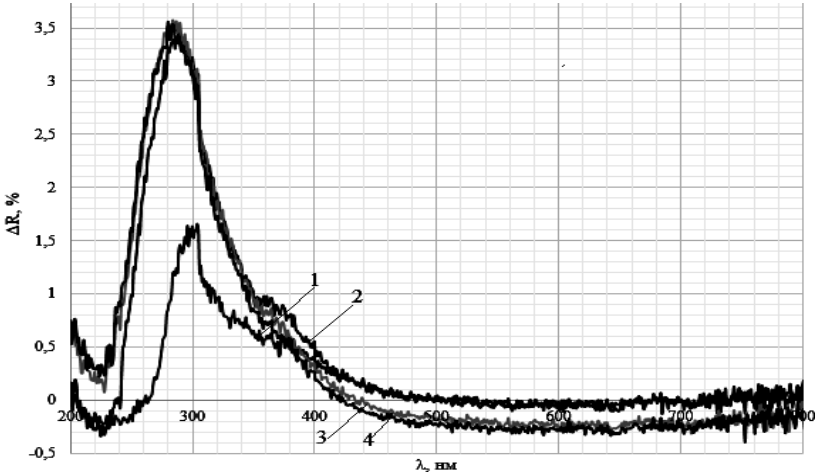


Рис. 2. Разностный коэффициент отражения кристалла КТР при облучении белым СИД (1 Вт) после облучения: *1* –10 мин; *2* – 30 мин; *3* –60 мин; *4* –120 мин

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокина Н.И., Воронова В.И. Структура и свойства кристаллов семейства титанил-фосфата калия // Кристаллография. – 2007. – Т. 52, № 1. – С. 82–95.

2. Краковский В.А. Рост и физические свойства высокоомных кристаллов КТР / В.А. Краковский, Л.Я. Серебренников, И.А. Паргачев и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8–3. – С. 52–53.

3. Кистенева М.Г. Фото- и термоиндуцированные изменения поглощения света в кристалле титаната висмута, легированном алюминием / М.Г. Кистенева, С.М. Шандаров, А.С. Акрестина и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53, № 9–3. – С.145–146.

УДК 535.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Е.В. Бакаулова, К.Б. Кемелханова, студентки каф. ЭП;
К.М. Мамбетова, инженер каф. ЭП
Научный руководитель С.М. Шандаров, зав. каф. ЭП, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, kamila_2000kz@mail.r и liza.bakaulova@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных

голограмм в пластине X-среза $LiNbO_3$:Cu с диффузионным легированием.

Ключевые слова: фотовольтаический пинцет, ниобат лития, электрическое поле фоторефрактивной решетки.

Электрические поля, создаваемые фоторефрактивными голограммами, существуют и вне кристалла, вблизи его границы [1]. Значительная напряженность этих пространственно-неоднородных полей на границе кристалла и возможность управления ими путем изменения формирующих фоторефрактивную голограмму световых пучков определяет интерес к ним, связанный с возможностью реализации оптических пинцетов [2–4]. В настоящей работе выполнено численное моделирование динамики формирования поля пространственного заряда фоторефрактивных голограмм в пластине X-среза $LiNbO_3$:Cu с диффузионным легированием, описанной в [4]. В расчетах, направленных на оптимизацию условий фотовольтаического агрегирования нано- и микрочастиц на её поверхности, используются соотношения и параметры кристалла $LiNbO_3$:Cu из [5].

Поле пространственного заряда, формирующееся в рассматриваемом образце X-среза $LiNbO_3$:Cu с диффузионным легированием, является суперпозицией пространственных гармоник вида [5]

$$E_{sc}^{(n)}(x,z,t) = E_n(x,t)\cos\left(n\frac{2\pi}{\Lambda}z\right), \tag{1}$$

с номерами $n = 0, 1, 2, \ldots$ и амплитудами $E_n(x,t)$, которые определяются разложением в ряд по модифицированным функциям Бесселя n-го порядка, $I_n\left(mt/\tau(x)\right)$ и могут быть представлены в виде

$$E_0(x,t) = -\frac{E_{phv}^m}{2}\left\{1-\exp\left[-\frac{t}{\tau(x)}\right]\mathrm{I}_0\left(\frac{mt}{\tau(x)}\right)\right\}, \tag{2}$$

$$E_n(x,t) = -E_{phv}^m\,\mathrm{I}_n\left(\frac{mt}{\tau(x)}\right)\exp\left(-\frac{t}{\tau(x)}\right). \tag{3}$$

Здесь время релаксации $\tau(x)$ и максимальное фотовольтаическое поле E_{phv}^m описываются выражениями

$$\frac{1}{\tau(x)} = \frac{e\mu S_w C_{Cu^+}^m}{\varepsilon_3\gamma C_{Cu^{2+}}^m} J_0 \exp\left[-\frac{\sqrt{\pi}}{2}k_{532}(0)\Delta x\,\mathrm{erf}\left(\frac{x}{\Delta x}\right)\right], \tag{4}$$

$$E_{phv}^m = \frac{2G_e\hbar\omega_w\gamma}{e\mu}C_{\mathrm{Cu}^{2+}}^m, \tag{5}$$

где $\mathrm{erf}(x/\Delta x)$ – интеграл вероятности; Λ – пространственный период и m – контраст интерференционной картины, создаваемой в кристалле двумя записывающими волнами с суммарной интенсивностью J_0;

ε_3 – статическая диэлектрическая проницаемость кристалла для поля вдоль полярной оси Z; e – элементарный электрический заряд; $\hbar\omega_w$ – энергия кванта записывающего излучения; μ – подвижность электронов; γ – коэффициент двухчастичной рекомбинации; G_e – константа Гласса; S_w – сечение фотоионизации донорных центров Cu^+ с максимальной концентрацией $C^m_{Cu^+}$ и $C^m_{Cu^{2+}}$ – максимальная концентрация ловушечных центров Cu^{2+}.

Результаты расчета динамики для нулевой, первой, второй и третьей пространственных гармоник по соотношениям (2)–(5) на глубинах от поверхности кристалла x = 0, 100, 200 и 300 мкм представлены на рис. 1, *а–г* соответственно.

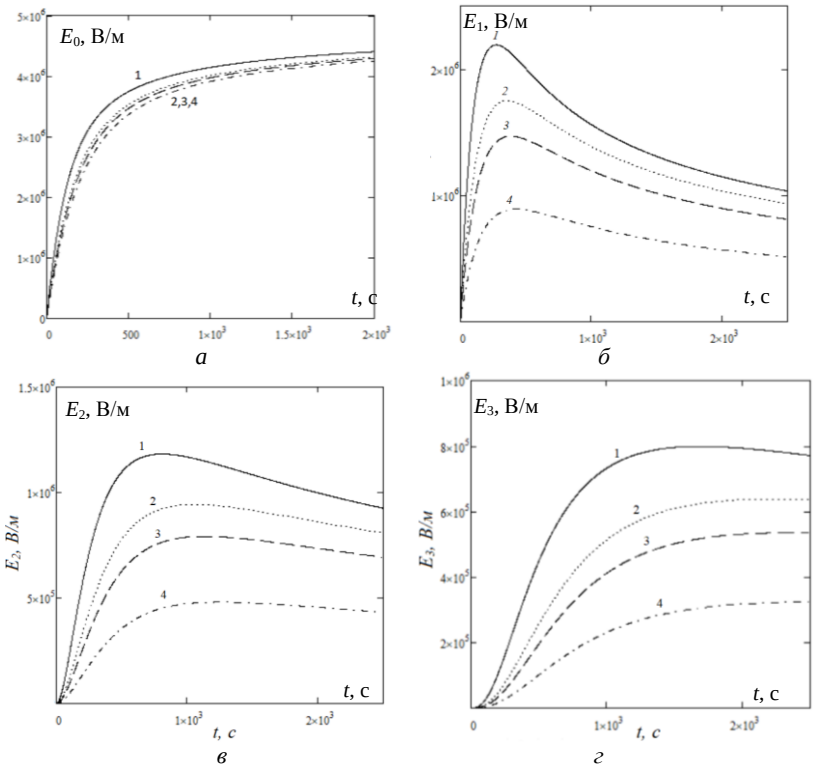


Рис. 1. Временная зависимость амплитуды нулевой (*а*), первой (*б*), второй (*в*) и третьей (*г*) пространственных гармоник электрического поля фоторефрактивной решетки в пластине $LiNbO_3$: Cu с диффузионным легированием на глубинах x = 0 (*1*), 100 (*2*), 200 (*3*) и 300 мкм (*4*)

В расчетах принималось, что фоторефрактивная голограмма записывалась картиной интерференции двух одинаковых лазерных пучков с длиной волны 532 нм, с интенсивностью $J_0 = 130$ мВт/см^2 для каждого из них. Как видно из рис. 1, постоянная составляющая поля пространственного заряда $E_0(x,t)$ (см. рис. 1, *а*) монотонно растёт со временем засветки кристалла, слабо изменяясь с глубиной и достигая значений, превышающих 3 МВ/м при $x = 0$ и $t > 150$ с. Амплитуды остальных пространственных гармоник, $E_1(x,t)$ (*б*), $E_2(x,t)$ (см. рис. 1, *в*) и $E_3(x,t)$ (*г*), уменьшаются с глубиной x значительно быстрее, чем $E_0(x,t)$.

На границе кристалла $x = 0$ их зависимость от времени носит немонотонный характер, при этом достигаемые максимальные значения амплитуды составляют около 2,2 МВ/м для первой гармоники, 1,2 МВ/м – для второй и 0,8 МВ/м – для третьей гармоники. Время достижения этих максимальных значений растет с номером гармоники, составляя от 270 с для первой гармоники, до 1600 с для третьей.

Таким образом, оптимальное фотовольтаическое агрегирование нано- и микрочастиц в виде пространственно-периодического распределения с периодом Λ на поверхности исследованного кристалла X-среза $LiNbO_3$:Cu с диффузионным легированием может быть реализовано электрическим полем фоторефрактивной голограммы, записываемой картиной интерференции лазерных пучков с приведенными выше параметрами, за время, составляющее около 270 с.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Буримов Н.И., Шандаров С.М. Структура упругих и электрических полей, возникающих вблизи границы кристалла $LiNbO_3$ при фотогальваническом механизме записи фоторефрактивных решеток // ФТТ. – 2006. – Т. 48, № 3. – С. 491–496.

2. Kukhtarev N., Kukhtareva T., Okafor F. Optical trapping of nano-(micro)particles by gradient and photorefractive forces // Journal of Holography and Speckle. – 2009. – Vol. 5, Is. 3. – P. 268–274.

3. García-Cabañes A., Blázquez-Castro A., Arizmendi L., Agulló-López F., Carrascosa M. Recent achievements on photovoltaic optoelectronic tweezers based on lithium niobate // Crystals. – 2018. – Vol. 8, Is. 4. Art. No. 041101.

4. Мамбетова К.М., Шандаров С.М., Татьянников А.И., Смирнов С.В. Агрегирование диэлектрических наночастиц на X-срезе кристалла $LiNbO_3$:Cu электрическими полями фоторефрактивных голограмм // Изв. вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 89–93.

5. Мамбетова К.М., Шандаров С.М., Орликов Л.Н., Арестов С.И., Смирнов С.В., Серебренников Л.Я., Краковский В.А. Формирование динамических фоторефрактивных решеток в кристалле $LiNbO_3$:Cu с поверхностным легированием // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Т. 126, № 6. – С. 858–863.

УДК 535.662.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЕТОК БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

П.К. Сафронова, студентка каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, safkonik@gmail.ru

Разработаны схемы экспериментальных установок для формирования двумерных бесселеподобных световых пучков и исследования оптического индуцирования фотонных структур в кристалле ниобата лития двумерными световыми пучками с бесселеподобным профилем при $\lambda = 532$ нм. Получен ряд распределений в зависимости от параметра кольцевой маски.

Ключевые слова: функция Бесселя, одномерное и двумерное распределение интенсивности света, фоторефракция, фотонная решетка.

Объектом исследования являются бесселеподобные пучки, которые являются квазибездифракционными и имеют высокий показатель продольного размера. Благодаря наличию центрального максимума интенсивности, имеющего небольшие поперечные размеры, эти пучки могут использоваться в разных сферах когерентно-оптических измерений и комплексах обработки данных [1].

Целью данной работы является исследование формирования микроразмерных фотонных решеток бесселеподобным световым пучком в кристалле ниобата лития, а также исследование пространственной структуры фазовых дифракционных элементов в процессе их оптического индуцирования.

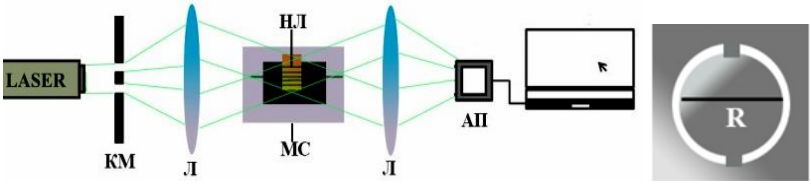
Фазовые решетки в фоторефрактивном образце можно сформировать, используя разные оптические схемы. В эксперименте использовался проекционный метод, позволяющий масштабировать размеры изображения полученной интерференционной картины в объёме кристалла.

На рис. 1, *а* приведена структурная схема установки. Источником излучения является вторая гармоника твердотельного лазера YAG:Nd^{3+} с длиной волны света $\lambda = 532$ нм. Используемый амплитудный транспарант (рис. 1, *б*) представлял собой кольцевую маску (КМ)

шириной 50 мкм с парой перемычек. Ширина непрозрачной области составляла 450 мкм. Транспарант располагался в передней фокальной плоскости линзы (Л) (F = 8 см), а кристаллический образец размещается в области ее задней фокальной плоскости.

Кристалл, легированный железом, $LiNbO_3$:Fe (НБ), имел размеры $10\times20\times2$ мм^3 по осям X, Y и Z соответственно.

Волновой вектор интерференционной картины ориентировался вдоль оси X, а поляризация света соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Распределения интенсивности света на выходной плоскости образца в процессе формирования в нем фазовой дифракционной структуры изучались с помощью анализатора лазерных пучков АП.



а *б*

Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки и топология амплитудного транспаранта

На рис. 2 иллюстрируется временная эволюция распределения интенсивности и соответствующих профилей на выходной грани кристалла в направлении оси X и оси Y кристалла. Пространственные периоды Λ_x и Λ_y не превышают 100 мкм.

Можно наблюдать, что в начальный момент времени профиль интенсивности светового поля можно качественно аппроксимировать теоретической функцией Бесселя, но с увеличением времени экспозиции световая мощность перераспределяется из центрального максимума в соседние. Это обусловлено тем, что в процессе записи дифракция формирующих структуру волн приводит к изменению распределения интенсивности записывающего поля внутри материала и формирование решетки продолжается в соответствии с измененным распределением светового поля. В каждый момент времени два взаимосвязанных процесса – формирование решетки и самодифракция записывающих волн, протекая одновременно, приводят к формированию фазовой дифракционной структуры со сложным пространственным амплитудно-фазовым распределением.

Таким образом, проведено исследование оптического индуцирования фотонных двумерных решеток кольцевой симметрии в объеме фоторефрактивного кристалла ниобата лития световым бесселеподоб-

ным световым пучком и определено оптимальное время экспонирования, равное 4 мин.

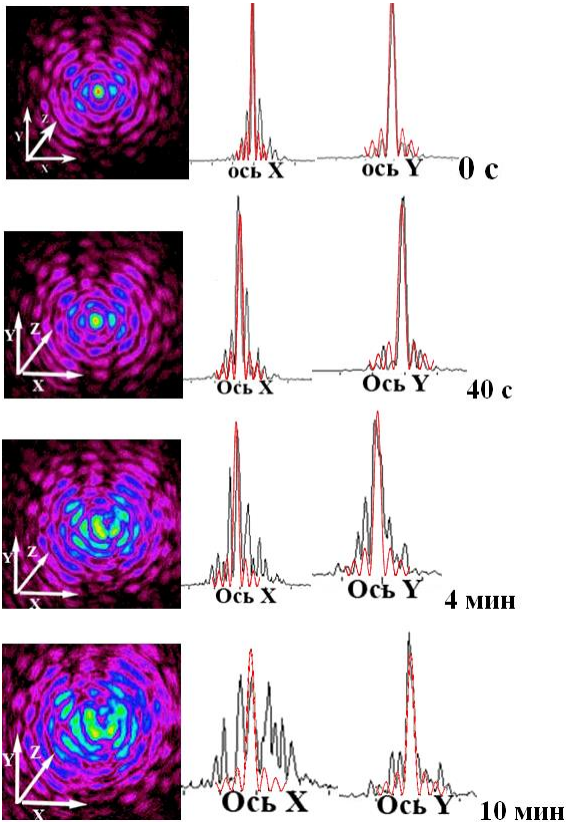


Рис. 2. Картины двумерного распределения светового пучка и соответствующие профили интенсивности в ближней зоне (на выходной плоскости пластины $LiNbO_3$:Fe) по осям *X* и *Y* в процессе экспонирования ($\Lambda_x \sim 85$ мкм, $\Lambda_y \sim 60$ мкм)

ЛИТЕРАТУРА

1. Siviloglou G. et al. Airy beams: a new class of optical waves // Optics and Photonics News. – 2008. – Vol. 19? № 12. – P. 21–21

2. Hovsepyan R-K. Micro- and nano-scale photonic lattices induced by Bessel beam technique in doped lithium niobate crystals / R.-K. Hovsepyan, P. Mantashan, V. Mekhitarian // SPIE-Intl Soc Optical Eng in Photonics Europe. – 2016. – Vol. 8425. – P. 535–544.

3. Cagniot E., Fromager M. Transverse superresolution technique involving rectified Laguerre - Gaussian $LG(p)^0$ beams // JOSA A. – 2011. – № 8. – P. 1709–1715.

УДК 621.396.41

СПЕКТР ОПТИЧЕСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУРЫ GaN/Al_2O_3

А.В. Михайленко, К.Г. Аксёнов, студенты каф. ЭП
Научный руководитель С.М. Шандаров, зав. каф. ЭП, д.ф.-м.н., проф.
г. Томск, ТУСУР, nastyamih1999@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и аппроксимации спектральной зависимости коэффициента отражения пленки GaN, выращенной на сапфировой подложке, в диапазоне от 370 до 900 нм.

Ключевые слова: нитрид галлия, спектральные зависимости коэффициента отражения, двухлучевой спектрофотометр.

Пленки нитрида галлия перспективны для реализации на их основе различных элементов полупроводниковой оптоэлектроники и волноводной фотоники [1, 2]. Для определения оптических параметров таких пленок, обычно выращиваемых на подложках Al_2O_3, могут использоваться спектроскопические исследования коэффициентов отражения и пропускания структур GaN/Al_2O_3 [2, 3]. В данной работе представлены результаты исследования спектра оптического отражения структуры GaN/Al_2O_3 в диапазоне 370–900 нм.

Исследуемый образец представлял собой пленку нитрида галлия с толщиной около 10 нм, нанесенную в Центре нанонауки и нанотехнологий Тайваньского национального университета Сунь Ятсена на полированную поверхность подложки из сапфира толщиной d_s = 0,8 мм. Подложка имела поперечные размеры 10×10 мм^2, а её вторая грань была шлифованной и оптической полировке не подвергалась.

Измерения спектральных зависимостей коэффициентов отражения $R(\lambda)$ образца проводились со стороны пленки GaN на спектрофотометре Shimadzu UV-2700. Экспериментальные данные регистрировались с шагом 1 нм, при диаметре апертурной диафрагмы 5 мм и трех значениях ширины щели $\Delta\lambda$ = 1, 2 и 5 нм и усреднялись по пяти измерениям. В используемом двухлучевом спектрофотометре реализуется метод сравнения интенсивностей пучков, отраженных от образца и от входящего в комплект эталонного алюминиевого зеркала, при угле падения 5°. Поэтому расчет абсолютной величины $R(\lambda)$ образца GaN/Al_2O_3 проводился с учетом значений коэффициента отражения данного зеркала $R_{Al}(\lambda)$, измеренных ранее в работе [4].

Получено, что наименьшими отклонениями от гладкой кривой в области прозрачности пленки GaN, в диапазоне 370–900 нм, характеризуются экспериментальные данные для $R(\lambda)$, полученные при

$\Delta\lambda$ = 1 нм. Они представлены на рис. 1 зависимостью *1*, состоящей из сливающихся синих точек.

Для расчета спектральных зависимостей $R(\lambda)$ использовались соотношения, принимающие во внимание как зеркальные отражения света от пленки GaN с толщиной *h*, нанесенной на полированную сапфировую подложку, так и диффузное отражение от тыльной шлифованной стороны подложки, приведенные в работе [2]. Учет дисперсии показателей преломления для подложки в расчетах $R(\lambda)$ проводился с использованием формулы Зельмейера [5] для обыкновенных волн в сапфире.

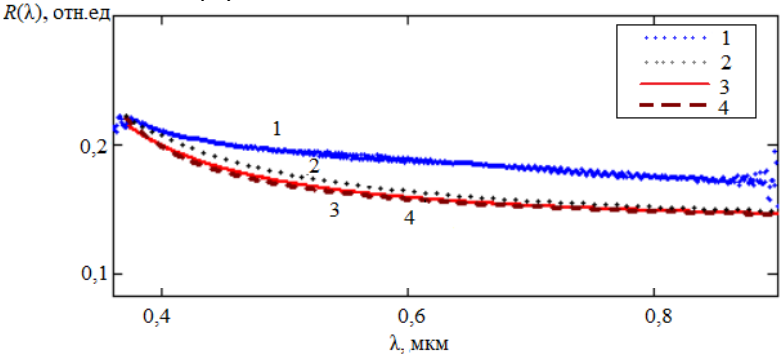


Рис. 1. Экспериментальные (*1*) и рассчитанные (*2–4*) спектральные зависимости коэффициента отражения $R(\lambda)$ структуры GaN/Al_2O_3. *2–4* – расчет с использованием формул Зельмейера из работ [6–8] соответственно

Показатели преломления нитрида галлия рассчитывались по приведенным в работах [6–8] формулам Зельмейера трех видов. При этом зависимости $R(\lambda)$, показанные на рис. 1 кривыми *2–4* соответственно, были близки друг к другу, если в расчетах использовались значения толщины пленки GaN *h* = 13,4, 11,6 и 12,5 нм, а параметр ξ, введенный в [2] для учета потерь на рассеяние на оптических неоднородностях шлифованной грани подложки Al_2O_3, принимался равным единице.

Как следует из рисунка, используемая теоретическая модель качественно описывает экспериментальные данные. Однако количественные отличия расчетных кривых *2–4* от экспериментальной зависимости 1 являются достаточно заметными. Это может быть связано с как недостаточно высоким качеством плёнки GaN, толщина которой близка к 10 нм, так и с оптическими потерями в ней, которые в расчётах во внимание не принимались.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2020–2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3). Авторы благодарят Р.В. Ромашко,

С.М. Шандарова и А.С. Акрестину за предоставление образца GaN/Al_2O_3 и полезные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Purnamaningsih T.W., Poespawati N.R., Abuzairi T., Dogheche E. An optical power divider based on mode coupling using GaN/Al_2O_3 for underwater communication // Photonics. – 2019. – Vol. 6. – Art. 63.

2. Кистенева М.Г., Акрестина А.С., Худякова Е.С. и др. Оптические и волноводные свойства эпитаксиальных структур GaN/InGaN, выращенных на сапфировой подложке // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8-3. – С. 24–27.

3. Заяц Н.С., Генцарь П.А., Бойко В.Г. и др. Оптические свойства пленок GaN/Al_2O_3, легированных кремнием // ФТП. – 2009. – Т. 43, вып. 5. – С. 617–620.

4. Шандаров С.М., Акрестина А.С., Михайленко А.В., Аксенов К.Г. Измерения спектральной зависимости коэффициента отражения комплектного алюминиевого зеркала спектрофотометра Shimadzu UV-2700 // Сб. докл.: Шарыгинские чтения. I Всерос. науч. конф., 18–19 сент. 2019 г. – Томск, 2019. – С. 68–72.

5. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.И. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М.: Наука, 1965. – 346 с.

6. Bowman S.R., Brown C.G., Brindza M. et al. Broadband measurements of the refractive indices of bulk gallium nitride // Optical Material Express. – 2014. – Vol. 4, No. 7. – P. 1287–1296.

7. Yu G., Wang G., Ishikawa H. et al. Optical properties of wurtzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge (0.78–4.77 eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method // Applied Physics Letters. – 1997. – Vol. 70, No. 24. – P. 3209–3211.

8. Bergmann M.J., Özgűr Ű., Casey H.C. et al. Ordinary and extraordinary refractive indices for $Al_xGa_{1-x}N$ epitaxial layers // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 75, No. 1. – P. 67–69.

УДК 661.715.1+544.541

ИЗУЧЕНИЕ ИК-СПЕКТРОВ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ZrO_2

В.А. Горончко, аспирант каф. ЭП;
М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н., проф.
г. Томск, ТУСУР, W_Goronchko@mail.ru

Рассмотрены исследования композитов на основе полимерных матриц с добавлением наночастиц. Данные материалы широко используются для ослабления и поглощения излучения с высокой энергией. Из-за большого отношения площади поверхности к объему наночастицы обладают повышенной способностью поглощать частицы с высокой энергией, поэтому нанокомпозиты могут быть ис-

пользованы для исследования эффективной защиты от солнечной радиации.

Ключевые слова: нанокомпозиты, нанопорошки ZrO_2, полипропилен, радиационная стойкость полимеров, ИК-спектры полипропилена.

В данной работе рассматривается материал полипропилен (ПП), модифицированный наночастицами ZrO_2. Были изготовлены следующие образцы в виде пленок толщиной 0,5 мм: чистый ПП, ПП+0,5 мас.% ZrO_2, ПП+1 мас.% ZrO_2, ПП+3 мас.% ZrO_2, ПП+5 мас.% ZrO_2.

В ИК-спектрах пропускания образцов полипропилена, немодифицированного и модифицированного нанопорошками диоксида циркония, регистрируются три области полос (рис. 1, 2): 3150–4000; 1500–2650 и 400–1400 $см^{-1}$. При введении наночастиц в объём полимера новые полосы поглощения не проявляются, но коэффициент пропускания уменьшается по всему спектру. С увеличением концентрации наночастиц интенсивность полос уменьшается вплоть до нуля.

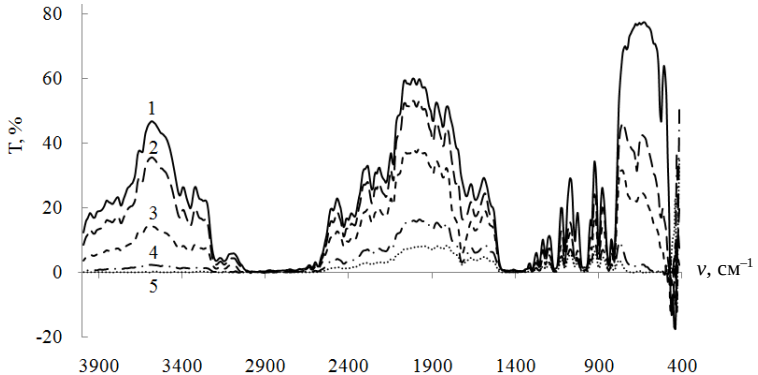


Рис. 1. ИК-спектры пропускания образцов полипропилена до облучения исходного (*1*) и модифицированного наночастицами ZrO_2 различной концентрации, мас.%: *2* – 0,5; *3* – 1; *4* – 3; *5* – 5

Расшифровка ИК-спектра полипропилена затруднена тем, что образец не является ни полностью кристаллическим, ни полностью аморфным, макромолекулы технического полимера имеют конечную длину и содержат разветвления (полосы малой интенсивности), после проведения облучения потоком электронов могут также возникнуть дефекты, которые активируют оптически неактивные колебания (химические примеси, конформационная нерегулярность цепи). В области спектра твердого полипропилена от 500 до 5800 $см^{-1}$ обнаружено около 90 полос [1].

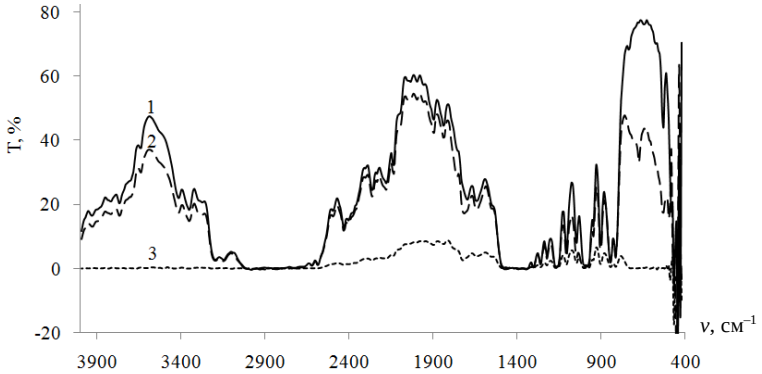


Рис. 2. ИК-спектры пропускания облученных электронами (E = 30 кэВ, Ф = $3 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, P = $2 \cdot 10^{-6}$ Тор, T = 300 К) образцов полипропилена исходного (*1*) и модифицированного наночастицами ZrO_2 различной концентрации, мас.%: *2* – 0,5; *3* – 5

Для анализа влияния модифицирования и последующего облучения потоком электронов с энергией 30 кэВ на ИК-спектры были взяты следующие ранее идентифицированные полосы [2, 3]. Полоса при 524 см$^{-1}$, обусловленная слабыми маятниковыми колебаниями CH_2-групп, а также растяжением C-CH_3-групп. Полоса при 671 см$^{-1}$, определяемая вибрацией метиленовых CH_2-групп и растяжением C-CH_3-групп. Полоса при 1628 см$^{-1}$, обусловленная карбонильными группами и абсорбцией C=CH-CO-OH групп. Полоса при 1890 см$^{-1}$, определяемая абсорбцией -CCH_3-CH_2-CO-CH_3 групп. Полоса при 2253 см$^{-1}$, обусловленная растяжением нитридных групп и полоса при 3341 см$^{-1}$, обусловлена образованием карбонильной группы C = O и гидроксильной группы OH [3, 4].

Уменьшение интенсивности полос поглощения при 524, 671, 1628, 1890, 2253 и 3341 см$^{-1}$ свидетельствует от том, что при введении наночастиц концентрация CH_2-групп, C-CH_3-групп, C=CH-CO-OH, абсорбция -CCH_3-CH_2-CO-CH_3 группы C=O и гидроксильной группы OH уменьшаются. Эти группы или радикалы существуют в ПП до модифицирования, и хорошо регистрируются в ИК-спектрах поглощения. Уменьшение их концентрации в модифицированных образцах может быть обусловлено тем, что в процессе модифицирования происходит взаимодействие этих групп с ненасыщенными связями наночастиц. В зависимости от концентрации наночастиц, судя по интенсивности этих полос, они частично или полностью исчезают.

Концентрация этих групп в немодифицированном и модифицированных образцах столь велика, что если они и образуются при об-

лучении, то их количество существенно меньше по сравнению с количеством до облучения. Поэтому в ИК-спектрах такая небольшая добавка не обнаруживается.

В ИК-спектрах полипропилена могут также проявляться и другие полосы поглощения, обусловленные колебаниями различных групп [4]:

– деформационными колебаниями CH_3-групп (1380 $см^{-1}$) и алифатических CH_2-групп (1470 $см^{-1}$);

– валентными симметричными колебаниями алифатических CH_2-групп (2840 $см^{-1}$) и CH_3-групп (2880 $см^{-1}$);

– валентными асимметричными колебаниями алифатических CH_2-групп (2920 $см^{-1}$) и CH_3-групп (2950 $см^{-1}$).

Добавление наночастиц приводит к уменьшению пропускной способности в ИК-области вплоть до нуля (при концентрации наночастиц 5 масс.%) во всем исследуемом диапазоне. При облучении образцов потоком электронов с энергией электронов 30 кэВ наблюдается незначительное уменьшение пропускания, от 0,1 до 0,5% (в зависимости от концентрции наночастиц).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание FEWM-2020-0038.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дехант И. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант, Р. Данц, В. Киммер, Р. Шмольке, – М.: Химия, 1976. – 472 с.

2. Wieslawa U.D. The Use of the Spectrometric Technique FTIR-ATR to Examine the Polymers Surface – Poland, Technical University of Lodz, Department of Material and Commodity Sciences and Textile Metrology, 2012. – 104 p.

3. Andreassen E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene. – Polypropylene: An A-Z reference, 2013. – P. 320–328.

4. Купцов А.Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.

УДК 538.958

СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ $BaTi_{(1-x)}ZR_xO_3$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiO_2

М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н., проф.;
О.А. Алексеева, н.с., к.т.н.; А.Н. Лапин, с.н.с., к.т.н.;
С.А. Юрьев, с.н.с., к.т.н.; В.В. Каранский, аспирант каф. физики
г. Томск, ТУСУР, лаб. РКМ, membrana2010@mail.ru

Исследованы спектры диффузного отражения в области 0,25–2,5 мкм и в ИК-области и их изменение после облучения электронами синтезированных порошков $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ из порошка $BaCO_3$ микронных размеров и нанопорошков ZrO_2 и TiO_2. Установлена

большая радиационная стойкость таких порошков по сравнению с порошком, синтезированным из составляющих микронных размеров.
Ключевые слова: порошки, синтез, наночастицы, титанат бария, состав, спектры отражения, облучение, электроны.

Температура космических аппаратов (КА) поддерживается терморегулирующими покрытиями (ТРП) с определенными значениями интегрального коэффициента поглощения (a_s) и излучательной способности (ε): $T \sim a_s/\varepsilon$. Порошки $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ могут использоваться не только для регулирования, но и для стабилизации температуры, поскольку обладают фазовыми переходами (ФП) в области рабочих температур ±150 °С, где ε зависит от температуры.

Если основой ТРП будет соединение типа $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$, то при изменении температуры в области ФП пропорционально изменению коэффициента a_s будет изменяться его ε и температура КА будет стабилизирована. Такие покрытия называются термо-стабилизирующими (ТСП) в отличие от ТРП.

Целью настоящей работы является синтез и исследование оптических свойств соединений $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ с использованием порошков $BaCO_3$ микронных размеров и нанопорошков ZrO_2 и TiO_2 для увеличения радиационной стойкости [1].

Для синтеза твердотельным способом (прогрев смесей порошков при 800°С→1200°С) использовали порошок $BaCO_3$, нанопорошок ZrO_2 с размерами зерен 30–40 нм и нанопорошок TiO_2 со средним размером зерен 50 нм. Регистрацию спектров диффузного отражения (ρ_λ) и облучение порошков электронами (E = 30 кэВ, Ф = (0,5; 1; 2)·10^{16}см$^{-2}$, T = 300 К, $P \le 5\cdot10^{7}$ Тор, φ = 2,5·10^{12}см$^{-2}$с$^{-1}$) осуществляли в имитаторе условий КП «Спектр» [2]. По спектрам ρ_λ рассчитывали интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) и его изменение после облучения (Δa_s) с использованием международного стандарта [3]. После облучения порошков в разностных спектрах диффузного отражения ($\Delta\rho_\lambda$) образуется широкая полоса поглощения в области 380–100 нм с несколькими максимумами вблизи 500 нм. Ее характеристикой может быть площадь (S), определяемая произведением полуширины на высоту (рис. 1).

Из зависимости S синтезированных соединений $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ от флюенса электронов (таблица) следует, что наибольший рост происходит в порошке с наименьшей концентрацией атомов циркония.

Аналогичным образом изменяется и интегральный коэффициент поглощения a_s: наибольшие изменения происходят в порошке с наибольшей концентрацией атомов циркония. В зависимости от флюенса электронов для порошков с концентрацией атомов циркония

5 и 10 мас. % наблюдается значительный рост величины Δa_s на первом этапе до $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, затем при увеличении флюенса скорость роста уменьшается. Для порошка с наименьшей концентрацией циркония ситуация обратная: на первом этапе изменения коэффициента a_s очень незначительные, затем скорость роста увеличивается.

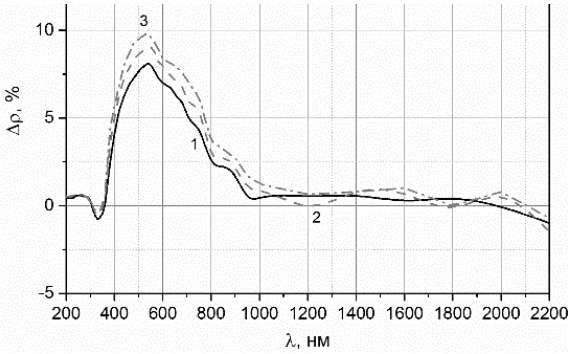


Рис. 1. Спектры ρ_λ до (*1*) и после облучения порошка $Ba_{0.85}Zr_{0.15}TiO_3$ флюенсом электронов с энергией 30 кэВ: $1 \cdot 10^{16}$ (*1*); $3 \cdot 10^{16}$ (*2*); $5 \cdot 10^{16}$ (*3*)

Зависимость площади полосы поглощения соединений $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ от концентрации атомов циркония (величины *x*) и флюенса электронов

Ф, см$^{-2}$		$1 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{16}$
x	0,05	8,0	9,6	10,7
	0,1	4,0	4,4	5,1
	0,15	1,4	2,2	3,0

Сравнение полученных данных с аналогичными данными на образцах $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ такого же состава, но синтезированных из других составляющих показывает следующее:

1. При x = 0,1 и 0,2 для $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$см$^{-2}$ Δa_s равно 0,257, 0,146 и 0022 для порошков, синтезированных из составляющих микронных размеров, с использованием наночастиц ZrO_2 и наночастиц ZrO_2 $+TiO_2$ соответственно.

2. При x = 0,1 и 0,2 для $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ Δa_s равно 0,317; 0,175 и 0,024 для порошков, синтезированных из составляющих микронных размеров, с использованием наночастиц ZrO_2 и наночастиц ZrO_2 $+TiO_2$ соответственно.

Для всех четырех примеров с различным составом смесей порошков и значениями флюенса электронов получается общая закономерность изменения коэффициента поглощения a_s: на первом месте по радиационной стойкости находится порошок, синтезированный с

применением наночастиц ZrO_2 и TiO_2, второе место занимает порошок, синтезированный с применением наночастиц ZrO_2, третье место по радиационной стойкости занимает порошок, при синтезе которого не использовали наночастицы.

Основным выводом выполненных исследований является установленное увеличение радиационной стойкости порошков $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$, синтезированных с использованием нанопорошков TiO_2 и ZrO_2, по сравнению со стойкостью порошков, синтезированных с использованием только нанопорошка ZrO_2 или только из порошков $BaCO_3+TiO_2+ZrO_2$ микронных размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект «Перспектива» № 19-32-60067.

ЛИТЕРАТУРА

1. Утебеков Т.А. Структура, оптические свойства и радиационная стойкость синтезированных порошков $BaTiZrO_3$: автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2010. – 19 с.

2. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Ya., Dvoretskii M.I. Apparatus for Study of Diffuse-Reflection and Luminescence Spectra of Solids in Vacuum (Article) // Instruments and experimental techniques. – N.Y. – July 1985. – Vol. 28, Is. 4, pt. 2. – P. 929–932.

3. ASTM E490-00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2005.

УДК 538.958

ВЛИЯНИЕ КВАНТОВ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА ZnO, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ SiO_2

В.В. Каранский, аспирант каф. физики

Научный руководитель М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, membrana2010@mail.ru

Исследованы изменения спектров диффузного отражения в области 0,25–2,5 мкм и интегрального коэффициента поглощения после облучения квантами солнечного спектра порошка ZnO, модифицированного наночастицами SiO_2. Установлено появление полосы поглощения в видимой области при 420 нм и увеличивающегося с ростом длины волны поглощения в ближней ИК-области. Выполнен анализ их изменения от времени облучения.

Ключевые слова: порошки, наночастицы, оптические свойства, кванты солнечного спектра, облучение.

Порошки оксида цинка находят широкое применение в качестве пигмента терморегулирующих покрытий (ТРП) космических аппаратов (КА) во всех космических фирмах начиная со времени первых космических полетов и до настоящего времени. В процессе орбитальных полетов на всех орбитах они подвержены действию квантов солнечного спектра (КСС), что приводит к образованию дефектов, появлению полос поглощению и уменьшению отражательной способности ТРП, изготовленных на их основе. Для увеличения их стойкости используют различные способы, одним из наиболее эффективных из которых является модифицирование наночастицами.

Целью настоящей работы является исследование изменений спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения (рабочей характеристики ТРП) наиболее используемого для этих целей в нашей стране порошка ZnO квалификации ОСЧ14-2, модифицированного наночастицами SiO_2.

Модифицирование осуществляли прогревом при 800 °С в течение 2 ч смесей этих порошков при концентрации наночастиц 3 мас.%. Предварительно смесь разводили в бидистилляте, диспергировали в магнитной мешалке, выпаривали при 150 °С, перетирали в агатовой ступке. Порошок запрессовывали в металлические чашечки, полученные образцы устанавливали в установке-имитаторе условий космического пространства «Спектр» [1].

Спектры диффузного отражения модифицированного порошка (nZnO) до облучения ($\rho_{\lambda 0}$) и после определенного времени облучения ($\rho_{\lambda t}$) регистрировали в диапазоне 0,35–2,1 мкм в вакууме на месте (in situ). Облучение осуществляли в вакуум $P \leq 510^{7}$ тор излучением ксеноновой дуговой лампы с интенсивностью, в 3 раза превышающей интенсивность излучения Солнца (0,139 Вт/см^2), при T = 300 К.

По этим спектрам рассчитывали разностные спектры диффузного отражения ($\Delta\rho_\lambda = \rho_{\lambda 0} - \rho_{\lambda t}$), представляющие собой спектры поглощения, наведенного действием КСС, а также интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) и его изменение при облучении (Δa_s). Коэффициент поглощения a_s является рабочей характеристикой ТРП, он определяет поток поглощенной энергии электромагнитного излучения Солнца и температуру КА, а его изменение – увеличение температуры. Расчет коэффициента поглощения a_s осуществляли с использованием международного стандарта [2].

Из спектров $\Delta\rho_\lambda$ следует (рис. 1), что после облучения КСС в течение 3, 6, 9, 12 и 15 ч регистрируется полоса поглощения в видимой области и увеличивающееся с ростом длины волны поглощение в ближней ИК-области.

Полоса в видимой области неравнобочная. При времени облучения 3 и 6 ч заметны два максимума, которые при увеличении времени облучения сливаются с образованием одной полосы при 420 нм. Длинноволновой фронт этой полосы затянут. Эти данные указывают на то, что она включает в себя несколько полос, которые обусловлены собственными точечными дефектами оксида цинка: катионных и анионных вакансий и междоузельных атомов цинка и кислорода в различном зарядовом состоянии, а также их комплексов. В ближней ИК-области поглощение оксида цинка, как и других полупроводниковых соединений, определяется переходами свободных электронов между уровнями в зоне проводимости, которое подчиняется степенной зависимости [3].

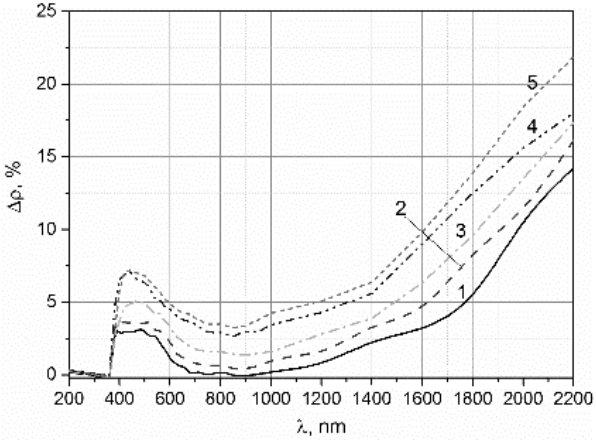


Рис. 1. Спектры $\Delta\rho_\lambda$ порошка nZnO после облучения КСС в течение 3 (*1*), 6 (*2*), 9 (*3*), 12 (*4*) и 15 (*5*) ч

С увеличением времени облучения интенсивность полосы при 420 нм увеличивается, увеличиваются также и значения $\Delta\rho$ в ближней ИК-области, что свидетельствует об увеличении концентрации как собственных точечных дефектов, так и свободных электронов.

Расчеты изменений коэффициента поглощения Δa_s по спектрам $\Delta\rho\lambda$ показали следующие значения: 0,018; 0,025; 0,035; 0,051 и 0,057 для времени облучения 3, 6, 9, 12 и 15 чв соответственно (рис. 2).

Сравнение полученных результатов с аналогичными данными по облучению немодифицированного порошка ZnO [4] показывает, что величины Δa_s модифицированного порошка несколько меньшие. Это свидетельствует об эффективности используемого метода увеличения стойкости оптических свойств порошка nZnO к действию КСС.

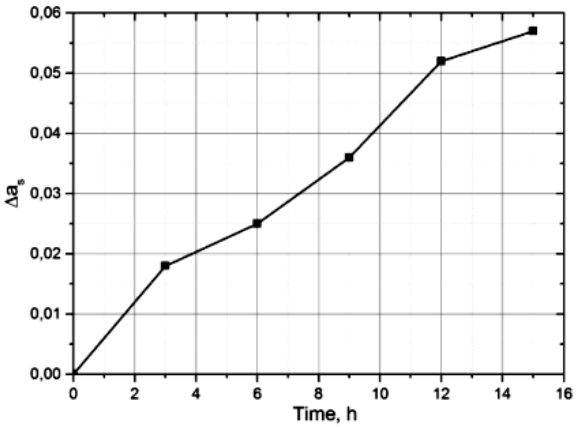


Рис. 2. Изменение коэффициента поглощения a_s порошка nZnO от времени облучения КСС

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание FEWM-2020-0038.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kositsyn L.G., Mikhailov M.M., Kuznetsov N.Ya., Dvoretskii M.I. Apparatus for Study of Diffuse–Reflection and Luminescence Spectra of Solids in Vacuum (Article) // Instruments and experimental techniques. – N.Y. – July 1985. – Vol. 28, Is. 4, pt. 2. – P. 929–932.

2. ASTM E903–96 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. – 2005.

3. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергия, 1976. – 416 с.

4. Михайлов М.М. Фотостойкость терморегулирующих покрытий космических аппаратов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 380 с.

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – **Заболоцкий А.М.**, проф. каф. ТУ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 621.372.542.29

СОЗДАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТА СЕТИ ПО MIL-STD-461 G ДЛЯ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

А.А. Дроздова, магистрант каф. ТУ
Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, anastasiya.drozdova.00@list.ru

Выполнен расчет номинальных значений электронной компонентной базы для создания эквивалента сети по схеме из стандарта MIL-STD-461 G. Выполнено преобразование путём перерасчета номинальных значений схемы эквивалента сети. При помощи RLC-измерителя в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц измерены номинальные значения компонентов, входящих в состав преобразованной схемы. Выполнено измерение *S*-параметров в диапазоне частот до 1 ГГц при помощи векторного анализатора цепей.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, эквивалент сети, кондуктивная помеха, силовая шина электропитания.

Испытания в области ЭМС проводят, используя специальные измерительные устройства, одним из которых является эквивалент сети (ЭС) [1]. В некоторых случаях для специализированных измерений электромагнитных помех и полного сопротивления источника вносят в схему ЭС изменения [2]. В работе [3] была представлена простая и экономически эффективная методика проектирования фильтра электромагнитных помех, основанная на измерениях во временной области. Методика позволила производить измерения без дорогостоящего оборудования, такого, как анализатор спектра. При этом анализ степени фильтрации силовой шины электропитания (СШЭП) к воздействию кондуктивных помех при подключении к ЭС не проводился. Таким образом, необходимо создать ЭС для измерения степени фильтрации СШЭП с гибридным помехозащитным фильтром.

Цель работы – создать ЭС по стандарту MIL-STD-461 G для СШЭП.

Для измерения степени фильтрации СШЭП с гибридным помехозащитным фильтром предложена схема подключения её к измери-

тельному приёмнику, источнику электропитания и нагрузке, используя ЭС. Схема позволяет оценить при помощи измерительного приёмника (ИП) степень фильтрации СШЭП с фильтром к воздействию кондуктивных помех от генератора в нагруженном состоянии СШЭП, источника постоянного электропитания и нагрузки (рис. 1, *а*).

В стандарте MIL-STD-461 G [4] представлена схема ЭС, содержащая элементы со значениями: $L1$ = 50 мкГн, $C1…C8$ = 8 мкФ, $C9…C12$ = 0,25 мкФ, $R1…R20$ = 5 Ом, $R21…R30$ = 1 кОм. Выполнено преобразование значений R, L и C элементов схемы ЭС для её реализации, используя широкодоступную электронную компонентную базу (рис. 1, *б*). Для обеспечения работы СШЭП от источника с постоянным напряжением 100 В и током не более 10 А компоненты выбраны с запасом по номинальным напряжению (250 В) и току (15 А). Рассчитано количество витков (n = 96) катушки индуктивности с воздушным заполнением диаметром 30 мм [5]. Катушка намотана проводом ПЭТВ-2 диаметром 1,6 мм.

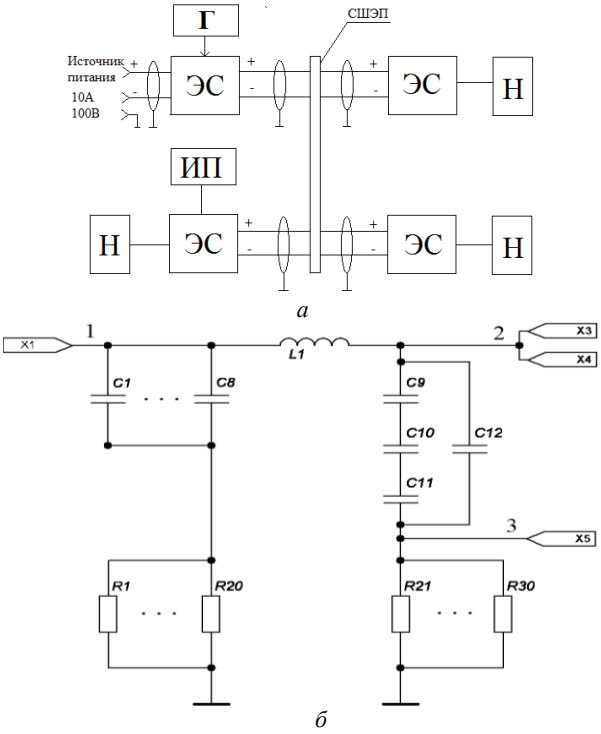
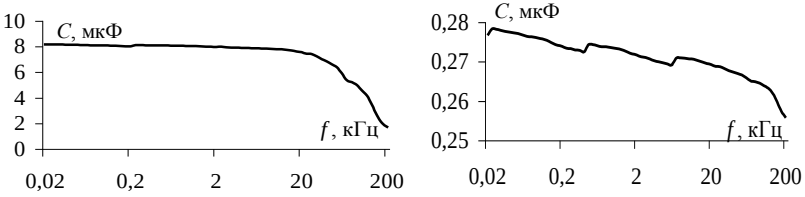


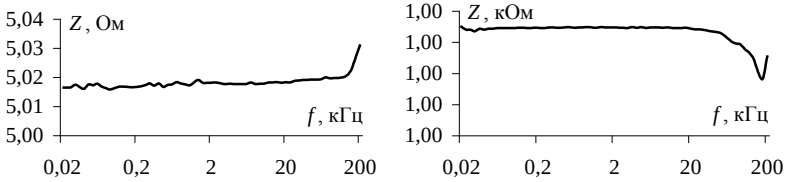
Рис. 1. Схема подключения ЭС к СШЭП (*а*)
и преобразованная схема ЭС по MIL-STD-461G [4] (*б*)

Измерены частотные зависимости *R*, *L* и *C* элементов, входящих в состав преобразованной схемы, при помощи *RLC*-измерителя R&S HM8118 в диапазоне частот от 20 Гц до 200 кГц. Измерения проводились (не менее 10 раз) для групп конденсаторов с общей емкостью 8 мкФ (рис. 2, *а*) и 0,25 мкФ (см. рис. 2, *б*), а также групп резисторов с общими сопротивлениями 5 Ом (рис. 3, *а*) и 1 кОм (см. рис. 3, *б*). Также выполнено измерение частотной зависимости катушки индуктивности (рис. 4). Данные измерения необходимы для создания симметричного устройства ЭС, что позволит корректно проводить измерения дифференциальной и синфазной составляющих кондуктивных помех.



а *б*

Рис. 2. Частотная зависимость ёмкости групп конденсаторов с общим значением *C*1, …, *C*8 = 8 мкФ (*а*) и *C*9, …, *C*12 = 0,25 мкФ (*б*)



а *б*

Рис. 3. Частотная зависимость сопротивления группы резисторов с общим значением *R*1, …, *R*20 = 5 Ом (*а*) и *R*21, …, *R*30 = 1 кОм (*б*)

Собран лабораторный макет ЭС (рис. 5) и выполнено измерение *S*-параметров в диапазоне частот до 1 ГГц при помощи векторного анализатора цепей R&S ZNA. Измерение проводилось в режиме псевдосогласования. Так, нагрузка с сопротивлением 50 Ом включалась последовательно в точки *1–3* (см. рис. 1, *б*).

Для оценки воздействия помехи, проходящей от испытуемого объекта в источник постоянного электропитания, нагрузка с сопротивлением 50 Ом включалась в точку *3* и измерялась частотная зависимость $|S_{21}|$ (рис. 6, *а*). На рис. 6, *б* представлено измерение частотной зависимости $|S_{23}|$, которая необходима для анализа ослабления

помехи, проходящей от ИО на ИП, при включении нагрузки в точку *1*. Из рис. 6, *в* видно ослабление помехи, проходящей от источника постоянного электропитания, в ИП при включении нагрузки в точку *2*. Во всех трех случаях среднее ослабление составило минус 100 дБ. При этом в области низких частот ослабление составило не менее минус 40 дБ.

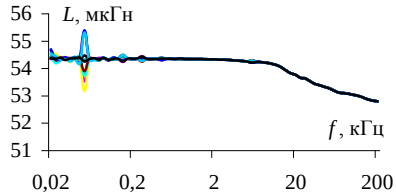


Рис. 4. Частотная зависимость индуктивности катушки *L*1

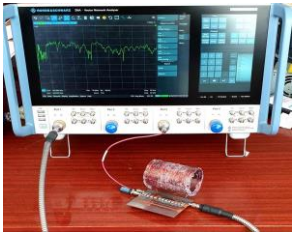
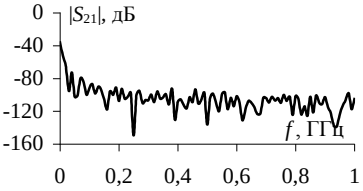
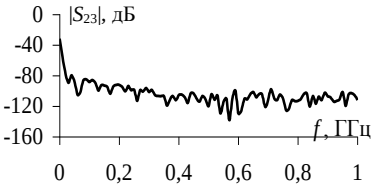


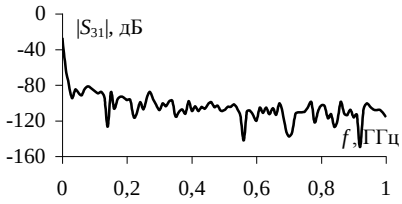
Рис. 5. Лабораторный макет для измерения параметров ЭС



а



б



в

Рис. 6. Частотные зависимости *S*-параметров ЭС: |*S*21| (*а*), |*S*23| (*б*) и |*S*31| (*в*)

Таким образом, для оценки степени фильтрации СШЭП с фильтром к воздействию кондуктивных помех был создан макет ЭС по стандарту MIL-STD-461 G. Выполнено преобразование значений *R*, *L* и *C* элементов схемы ЭС для нормальной его работы и обеспечения работы СШЭП от источника с постоянным напряжением 100 В и током не более 10 А. Измеренные частотные зависимости *R*, *L* и *C* элементов, входящих в состав преобразованной схемы, показали, что компоненты выбраны верно и схема соответствует стандарту

MIL-STD-461 G. Измерения частотной зависимости $|S_{21}|$ позволили оценить ослабление помехи, которое составляет минус 100 дБ, что является хорошим результатом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clayton R.P. Introduction to electromagnetic compatibility. – John Wiley & Sons, 1992. – 325 p.

2. Shang X. A noise source impedance extraction method for operating SMPS using modified LISN and simplified calibration procedure / X. Shang, D. Su, H. Xu, Z. Peng // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2017. – Vol. 32. – P. 4132–4139.

3. Mohit K. Power line filter design for conducted electromagnetic interference using time-domain measurements / K. Mohit, A. Vivek // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2006. – Vol. 48. – P. 178–186.

4. MIL-STD-461G. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, 2007. – 269 p.

5. Coil 32 – однослойная катушка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://coil32.ru/man/onelayer-inductor.html (дата обращения: 15.05.19).

УДК 621.372.211

АНАЛИЗ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

А.А. Дроздова, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, anastasiya.drozdova.00@list.ru

Выполнен анализ восприимчивости силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата (КА) к воздействию электростатического разряда (ЭСР). Анализ проведен, используя модель поперечного сечения СШЭП в виде симметричной экранированной линии. В качестве воздействия принят импульс ЭСР с формой тока по четвертой степени жесткости. Представлены зависимости изменения максимальной амплитуды от длины линии СШЭП КА.

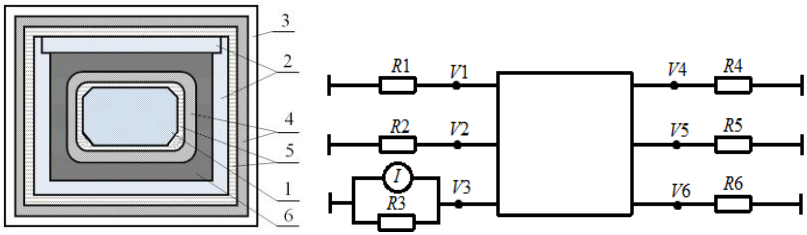
Ключевые слова: электромагнитная совместимость, силовая шина электропитания, электростатический разряд.

Воздействие ЭСР на радиоэлектронное средство (РЭС) способно негативно повлиять на его работоспособность. Используя имитационное моделирование, выполнен анализ воздействия ЭСР на персональный компьютер, которое выявило наиболее опасные участки воздействия [1]. Результаты сравнения моделирования с экспериментальны-

ми данными при воздействии ЭСР на металлическую крышку РЭС представлены в [2]. Проведено исследование временных характеристик прерывания тактового сигнала кварцевого автогенератора Пирса при воздействии на него ЭСР [3]. При этом исследований по влиянию ЭСР на СШЭП, выполненной в виде симметричной экранированной линии, не найдено. Однако подобная оценка необходима на этапе проектирования конструкции СШЭП.

Цель работы – выполнить анализ восприимчивости СШЭП КА к воздействию ЭСР.

Создана модель поперечного сечения СШЭП в виде симметричной экранированной линии передачи (рис. 1, *а*). Модель СШЭП (рис. 1, *б*) содержит проводники для прямых *1* (*V*1, *V*4) и обратных *2* (*V*2, *V*5) токов протекания, выполненные в виде металлических пластин. В качестве изоляторов использованы лак (ε_r = 4) *5*, полиамидная пленка с односторонним липким слоем (ε_r = 2,3) *4* и стеклотекстолит (ε_r = 4,3) *6*. Снаружи СШЭП покрыта лентой из арамидных нитей с обмоткой из медной посеребренной проволоки (ЛМАМс) *3* для защиты от ЭСР, который в модели является третьим проводником (*V*3, *V*6) СШЭП. Начало и конец каждого проводника нагружены на сопротивления *R*1–*R*6 = 50 Ом для обеспечения режима псевдосогласования. Выполнено моделирование воздействия ЭСР на ЛМАМс СШЭП (рис. 1, *б*), узел *V*3.



а *б*

Рис. 1. Поперечное сечение СШЭП (*а*) и схема воздействия ЭСР (*б*)

К сопротивлениям *R*1–*R*3 поочередно подключался генератор тока, имитирующий воздействие ЭСР. Форма тока выбрана по четвертой степени жесткости (τ_1 = 1,1 нс, τ_2 = 2 нс, τ_3 = 12 нс, τ_4 = 37 нс, I_1 = 30 А, I_2 = 16 А, n = 1,8) согласно ГОСТ Р 51317.4.2–2010 [4].

Для оценки воздействия ЭСР на СШЭП выполнено моделирование форм сигнала на ближнем и дальнем концах проводников СШЭП при изменении ее длины (l) от 0,5 до 3 м, с шагом 0,5 м. Представлены формы сигнала в начале (*V*3) и в конце (*V*6) проводника, имитирующего ЛМАМс при длинах СШЭП l = 0,5 м и l = 3 м (рис. 2, *а*). Формы

сигнала в начале и конце пассивных проводников при изменении l приведены на рис. 2, *б* и *в*.

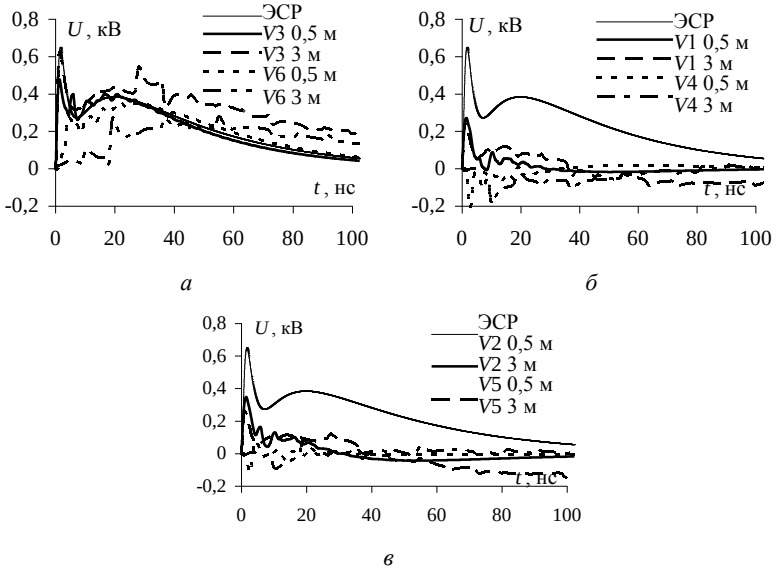


Рис. 2. Формы сигналов в узлах *V*3, *V*6 (*а*), *V*1, *V*4 (*б*), *V*2, *V*5 (*в*) при воздействии ЭСР в узел *V*3 и длинах СШЭП 0,5 и 3 м

Вычислены максимальные амплитуды в начале и конце проводников СШЭП при изменении l. Воздействие подавалось поочередно на прямой (*V*1) (рис. 3, *а*, *б*) и обратный (*V*2) (рис. 3, *в*, *г*) проводники, а также на ЛМАМс (*V*3) (рис. 3, *д*, *е*).

Из рис. 3, *а* видно, что при увеличении l максимальная амплитуда в узле *V*1 возросла в 1,3 раза, а в узлах *V*2 и *V*3 – в 1,4 и 1,5 раза соответственно. При этом максимальная амплитуда в конце активного проводника для l = 0,5 м составила 552 В, и с увеличением l она уменьшилась до 320 В (рис. 3, *б*), а в конце пассивных проводников – в 1,1 раза. Из рис. 3, *в* видно, что максимальная амплитуда в начале проводника обратного тока (*V*2) увеличилась в 1,4, а в начале проводника прямого тока и на ЛМАМс – в 1,4 и 1,3 раза соответственно. При этом максимальная амплитуда в узле *V*5 уменьшилась до двух раз с увеличением l. Так, в узле *V*4 она увеличилась до 382 В при l = 1 м и уменьшилась до 307 В при l = 3 м. В узле *V*6 амплитуда увеличилась до 418 В при l = 1 м и уменьшилась до 279 В при l = 3 м (рис. 3, *г*). На рис. 3, *д* представлен график зависимости максимальной амплитуды в начале линии при воздействии ЭСР на ЛМАМс.

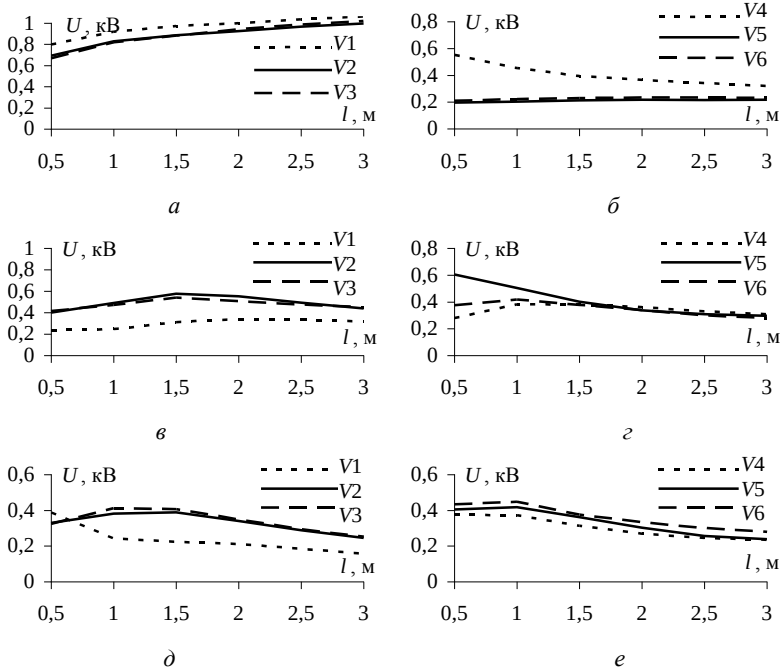


Рис. 3. Зависимость максимальной амплитуды в начале и конце при воздействии ЭСР на положительную (*а, б*), отрицательную (*в, г*) линии и на ЛМАМс (*д, е*) при изменении *l*

Максимальная амплитуда в узле *V*3 увеличилась до 412 В при *l* = 1 м и уменьшилась до 252 В при *l* = 3 м. На проводнике прямого тока (*V*1) максимальная амплитуда уменьшилась в 2,45 раза. В начале проводника обратных токов амплитуда увеличилась до 389 В при *l* = 1 м, а затем уменьшилась до 246 В при *l* = 3 м. Максимальная амплитуда в конце активного и пассивных проводников уменьшилась в 1,6 раза при увеличении *l* (рис. 3, *е)*. Выявлено, что при длинах СШЭП от 1 до 1,5 м амплитуды на ЛМАМс и обратном проводнике максимальны, на что следует обратить внимание при выборе размеров и проектировании СШЭП (рис. 3, *в*, *д*, *е*).

Показано, что при воздействии ЭСР на проводники для прямого и обратного тока увеличение *l* приводит к увеличению максимальной амплитуды в начале линии и к уменьшению в конце активной линии. При воздействии ЭСР на проводник прямого тока максимальная амплитуда в конце пассивных проводников увеличивается на 1,1 раза, а

при воздействии на проводник обратного тока уменьшается на 1,5 раза. При воздействии ЭСР на ЛМАМс увеличение l приводит к уменьшению максимальной амплитуды как в начале, так и в конце линии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гизатуллин З.М. Электромагнитная совместимость электронно-вычислительных средств при воздействии электростатического разряда // Проблемы в энергетике. – 2009. – № 1-2. – С. 104–112.

2. Агафонов А.М. Электромагнитная совместимость систем интеллектуального управления в условиях воздействия электростатических разрядов / А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, Е.С. Гришаков и др. // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1(43). – С. 192–196.

3. Ungru T. New Integrated Crystal Oscillator Design With Improved Robustness Against ESD Disturbances in Operation / T. Ungru, W. Wilkening, R. Negr // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 60. – P. 322–327.

4. ГОСТ Р 51317.4.2–2010 (МЭК 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний, 2010. – 26 с.

УДК 621.3

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЯЧЕЕК ДИСКРЕТИЗАЦИИ МОДЕЛИ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛНОВОЛНОВОГО АНАЛИЗА

С.Х. Карри, магистрант; Р.С. Суровцев, доцент, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, salim96@list.ru

Представлена оценка влияния параметров сетки дискретизации модели на результаты полноволнового моделирования прохождения сверхкороткого импульса по меандровой линии. Результаты оценки показали, что амплитуда импульса перекрестной наводки и четной моды зависит от параметров сетки дискретизации, что необходимо учитывать при моделировании меандровой линии.

Ключевые слова: меандровая линия, сверхкороткий импульс, полноволновое моделирование.

Во многих сферах жизни человека применяется радиоэлектронная аппаратура (РЭА), из-за её развития в направлении миниатюризации становится всё труднее обеспечить достаточную защищенность РЭА от электромагнитных воздействий, в частности, сверхкоротких импульсов (СКИ) [1]. Такие СКИ из-за малой длительности и высокой амплитуды способны выводить из строя элементы устройств РЭА,

минуя средства защиты. В настоящее время представлено множество исследований различных устройств на основе полосковых линий для защиты от СКИ и фильтрации сигналов в частотной области [2, 3], среди которых примечателен простой подход к защите устройства от СКИ, основанный на разложении СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды в меандровой линии задержки [4]. Применимость такого подхода подтверждается рядом теоретических и экспериментальных исследований [5]. При проектировании устройства защиты с использованием меандровых линий задержки широко используется имитационное моделирование, при этом полноволновой анализ позволяет получить результаты, наиболее приближенные к реальности. Одним из важных этапов моделирования после построения трехмерной модели линии является разделение её объёма на элементарные ячейки при помощи сетки дискретизации. От выбора параметров сетки напрямую зависят точность результатов моделирования и вычислительные затраты. Кроме того, точность результатов тем выше, чем выше степень дискретизации модели вблизи неоднородностей (например, на стыке проводника и подложки). Поэтому целесообразно выполнить анализ влияния параметров сетки на точность результатов моделирования.

Цель данной работы – выполнить анализ влияния количества ячеек сетки дискретизации на результаты полноволнового анализа меандровой линии методом конечных разностей во временной области. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: построить трехмерную модель меандровой линии; выполнить полноволновой анализ прохождения СКИ по витку меандровой линии при различном количестве ячеек сетки; выполнить сопоставление и анализ результатов.

Схема соединений и поперечное сечение линии, выбранной для моделирования (связанная микрополосковая линия), аналогична линии в [4, 5]. Значения сопротивлений на концах линии приняты равными 50 Ом. В качестве воздействующего сигнала принят оцифрованный с экрана комбинированного осциллографа С9-11 импульс, снятый с выхода его генератора [4].

Моделирование выполнено при следующем количестве ячеек: между проводниками (далее GAP) 1, 2, 3, 6; вдоль ширины каждого проводника (далее WIDTH) 4, 6, 10, 20; между проводниками и опорным слоем (далее SUB) 10, 20, 40, 80; вдоль длины линии (далее LONG) 100, 200, 400, 800. В качестве примера на рис. 2 представлен результат моделирования при наибольшем количестве ячеек сетки дискретизации. Выполнена оценка влияния количества ячеек на изме-

нение амплитуды первого, второго и третьего импульсов разложения. Значения амплитуд импульсов (V_1, V_2, V_3) и их изменения относительно предыдущего значения (ΔV_1, ΔV_2, ΔV_3) при различном количестве ячеек сетки сведены в таблицу. Из неё можно увидеть, что при увеличении любого из вышеуказанных параметров сетки дискретизации амплитуда первого импульса уменьшается, а второго и третьего импульсов – преимущественно увеличивается.

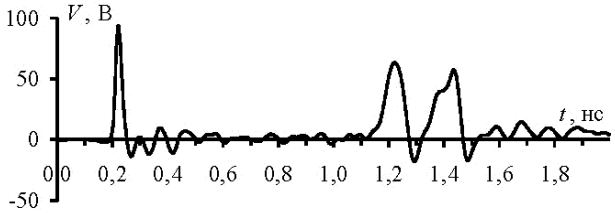


Рис. 1. Форма сигнала в конце линии
при наибольшем количестве ячеек сетки дискретизации

Значения амплитуд импульсов разложения

Изменяемый параметр		V_1, мВ	ΔV_1	V_2, мВ	ΔV_2	V_3, мВ	ΔV_3
GAP	1	92,55	–	62,7	–	54,22	–
	2	88,57	4,30	62,92	–0,36	54,53	–0,58
	3	87,97	0,68	62,77	0,24	56,17	–2,99
	6	87,73	0,27	62,84	–0,11	57,05	–1,58
WIDTH	4	93,38	–	63,15	–	57,17	–
	6	90,26	3,34	63,09	0,09	58,00	–1,45
	10	87,87	2,64	62,93	0,25	59,17	–2,02
	20	86,37	1,70	62,37	0,90	60,17	–1,69
SUB	10	92,82	–	59,27	–	54,30	–
	20	95,53	–2,93	59,67	–0,67	56,36	–3,80
	40	93,32	2,32	60,56	–1,50	57,06	–1,23
	80	87,79	5,93	62,79	–3,68	57,06	–0,01
LONG	100	97,60	–	60,03	–	50,96	–
	200	94,54	3,13	60,37	–0,57	56,08	–10,06
	400	93,32	1,29	60,57	–0,34	57,06	–1,73
	800	92,77	0,60	60,70	–0,22	57,04	0,03

Анализ результатов моделирования показал следующее. На амплитуду первого импульса наибольшее влияние оказывает изменение параметра WIDTH: его увеличение в 5 раз приводит к уменьшению амплитуды первого импульса на 7 мВ, или 7,5% от начальной амплитуды. При увеличении параметра SUB амплитуда первого импульса

изменяется неоднозначно: сначала возрастает, затем уменьшается. При этом амплитуда второго импульса, значение которой наиболее зависимо от SUB, уменьшается на 3,52 мВ, или 5,94%. Амплитуда третьего импульса уменьшается при изменении любого из параметров, но наиболее значительное уменьшение наблюдается при изменении параметра LONG. Увеличение данного параметра в 8 раз приводит к уменьшению амплитуды третьего импульса на 6,1 мВ, или 11,95%. Также необходимо отметить, что изменение параметров сетки дискретизации приводит к незначительному изменению задержек импульсов.

Таким образом, в работе представлены результаты анализа влияния количества ячеек дискретизации модели меандровой линии на результаты полноволнового анализа. Из результатов анализа видно, что при построении сетки дискретизации для достижения сходимости амплитуд импульсов достаточно использовать 3 ячейки между проводниками, 10 ячеек вдоль ширины каждого проводника, 40 ячеек между проводниками и опорным слоем и 400 ячеек вдоль длины линии.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита объектов топливно-энергетического комплекса от угроз электромагнитного воздействия / О. Петкау, А. Тарабцев, А. Дерябин, С. Ларионов, В. Чванов // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. – 2014. – Т. 2, № 6. – С. 74–76.

2. Weber T. Linear and Nonlinear Filters Suppressing UWB Pulses / T. Weber, R. Krzikalla, J. ter Haseborg // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 2004. – Vol. 46, № 3. – P. 423–430.

3. Qiang Cui. Investigation of waffle structure SCR for electrostatic discharge (ESD) protection / Qiang Cui, S. Dong, Y. Han // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC). – 2012. – P. 1–4.

4. Surovtsev R.S. Possibility of Protection Against UWB Pulses Based on a Turn of a Meander Microstrip Line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, A.M. Zabolotsky // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2017. – Vol. 58, № 6. – P. 1864–1871

5. Surovtsev R.S. Influence of losses on ultrashort pulse decomposition in a turn of meander microstrip line / R.S. Surovtsev, A.V. Nosov, T.T. Gazizov // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – June 30 – July 4, 2016. – P. 151–154.

УДК 519.612

РАСЧЕТ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.В. Клюкин, студент каф. ТУ;
А.А. Квасников, аспирант каф. ТУ
Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, yuhoo11@mail.ru

Расчет параметров линий передач является одним из важнейших этапов проектирования радиоэлектронных систем. В данной работе рассматривается один из методов расчета этих параметров – метод конечных элементов.

Ключевые слова: линии передачи, метод конечных элементов, погонные параметры.

С увеличением сложности радиоэлектронных средств (РЭС) увеличиваются затраты на их проектирование. Ключевыми элементами РЭС являются линии передачи. При их проектировании используются различные подходы и методы. В данной работе использован метод конечных элементов (МКЭ), являющийся одним из основных численных методов решения электромагнитных задач [1].

Цель данной работы – реализация алгоритма вычисления погонных параметров линии передачи.

Ранее авторами разработана программа для триангуляции двухмерных структур произвольной сложности [2]. Для достижения поставленной цели функционал этой программы был доработан. Так, работа программы начинается с построения поперечного сечения линии передачи с использованием геометрических параметров и булевых операций. Пользователь выбирает одну из доступных фигур и строит её на графической сцене. После чего задаются граничные условия и, при необходимости, уточняется геометрия структуры. По окончании построения модели задаются параметры сетки и производится её триангуляция. Полученные треугольники, их вершины и заданные граничные условия используются для нахождения полной энергии модели, на основании которой вычисляются погонные параметры линии передачи. При этом емкостная матрица является первичной. Так, для однопроводных линий передачи погонная емкость вычисляется как

$$C = 2 \cdot W / U^2,$$

где W – полная энергия модели, U – потенциал проводника.

Для многопроводных линий передач полная энергия считается несколько раз, исходя из количества проводников, при этом формиру-

ется емкостная матрица. Элементы на главной диагонали вычисляются по формуле

$$C_{ii} = 2 \cdot W_{ii},$$

где W_{ii} – энергия, рассчитанная при установленном на *i*-м проводнике потенциале в 1 В и заземленных остальных проводников. Элементы матицы $C_{ij}(i \neq j)$ вычисляются как

$$C_{ij} = W_{ij} - \frac{C_{ii} + C_{jj}}{2},$$

где энергия W_{ij} вычисляется при задании потенциала 1 В на *i*-м и *j*-ом проводниках [1].

Для тестирования программной реализации рассмотрены коаксиальная и двухпроводная микрополосковая линии передачи. Полученные результаты сравнены с результатами из работ [3–5] и результатами вычислений в программе ELCUT [6]. Геометрия моделей представлена на рис. 1.

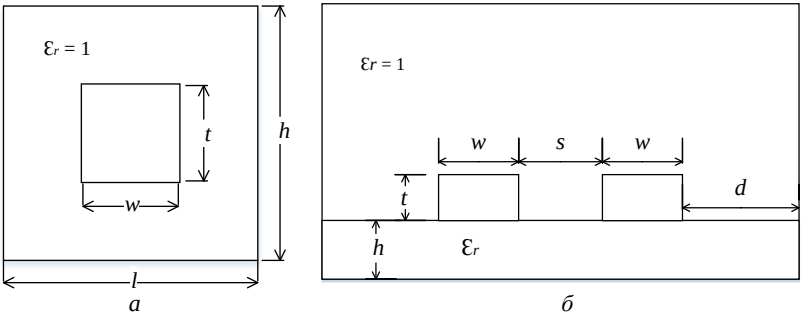


Рис. 1. Поперечные сечения коаксиальной (*а*)
и двухпроводной микрополосковой (*б*) линий передач

Вначале выполнено сравнение на примере коаксиальной линии передачи, рис. 1, *а* (структура 1), при следующих параметрах: *w* и *t* – ширина и толщина проводника 1 мм; *l* и *h* – ширина и высота экрана 3 мм. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Для двухпроводной линии передачи (рис. 1, *б*) вначале выполнено сравнение на примере структуры с параметрами (структура 2): относительная диэлектрическая проницаемость подложки ε_r =2, *h* – высота диэлектрического материала 1 мм, *w* – ширина проводника 3 мм, *s* – расстояние между проводниками 2 мм, *t* – толщина проводника 0,01 мм, *d* – расстояние до удаленных границ 16 мм. Результаты сведены в табл. 2.

Далее использована еще одна структура двухпроводной линии передачи (структура 3) с параметрами: ε_r = 5,18, h = 1,5 мм, w = 2,35 мм, s = 0,65 мм, t = 0,035 мм, d = 25 мм. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Из представленных таблиц видно, что полученные результаты в целом согласуются с результатами из других источников. При вычислении емкостной матрицы поэлементная погрешность составила менее 3% для диагональных элементов и 8% для внедиагональных. По сравнению с экспериментальными данными из [5] погрешность составила 5,9%.

Таблица 1

Погонная емкость (*C*, пФ/м), индуктивность (*L*, нГн/м) и волновое сопротивление (*Z*, Ом) структуры 1

Источник	*C*	*L*	*Z*
Наш	56,315	0,197	59,19
[3]	55,057	0,202	60,63
ELCUT	54,809	0,203	60,81

Таблица 2

Элементы емкостной матрицы (пФ/м) структуры 2

Источник	$C_{11} = C_{22}$	$C_{12} = C_{21}$
Наш	96,45	–8,82
[4]	94,82	–8,26
ELCUT	94,30	–8,57

Таблица 3

Элементы емкостной матрицы (пФ/м) структуры 3

Источник	$C_{11} = C_{22}$	$C_{12} = C_{21}$
Наш	138,02	–22,36
ELCUT	135,40	–20,91
Метод моментов [5]	130,30	–22,7
Метод конформных отображений [5]	131,30	–23,60
Эксперимент [5]	136,15	–22,85

Таким образом, реализован алгоритм расчета матриц погонных параметров линий передачи на основе программы триангуляции двухмерных структур. Полученные различия в результатах объясняются, по всей видимости, различием в использованных сетках (в указанных источниках отсутствуют сведения о качестве сетки, что затрудняет корректное сравнение). В дальнейшем планируется разработать алгоритм для построения неравномерной сетки, а также реализовать отображение напряженности электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Özgün Ö., Kuzuoğlu M. MATLAB-based Finite Element Programming in Electromagnetic Modeling. – CRC Press, 2018. – 428 p.
2. Клюкин Д.В. Программа триангуляции двухмерных структур произвольной сложности // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2019: матер. VIII регион. науч.-практ. конф. – Томск, 2019. – Т. 2. – С. 540–542.
3. Musa S.M., Sadiku M.N.O Computation of electrical parameters for different conducting bodies using finite element method // COMSOL [Электронный ресурс]. Научные статьи и публикации. – URL: https://www.comsol.ru/ paper/computation-of-electrical-parameters-for-different-conducting-bodies-using-finit-5502 (дата обращения: 04.03.2020).
4. Musa S.M., Sadiku M.N.O. Using finite element method to calculate capacitance, inductance, characteristic impedance of open microstrip lines // Wiley Periodicals, Inc. Microwave Opt Technol Lett 50: 611–614, 2008.
5. Стручков С.М. Методика конформных отображений для моделирования полосковых линий передачи и проектирование устройств на их основе: дис. … канд. тех. наук. – Томск, ТУСУР, 2016. – 148 с.
6. ELCUT – программа моделирования [Электронный ресурс]. – URL: https://elcut.ru/ (дата обращения: 04.03.2020).

УДК 621.396.669.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДРОССЕЛЕМ

А.М. Лакоза, магистрант каф. ТУ;
В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев, аспиранты каф. ТУ
Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н., доцент
г. Томск, ТУСУР, alexandrlakoza@mail.ru

Представлены частотные характеристики и конфигурации фильтров с разной компоновкой индуктивных элементов схемы. Выполнен сравнительный анализ.

Ключевые слова: гибридный дроссель, кондуктивные помехи, помехоподавляющий фильтр, балансные измерения.

Современная радиоэлектронная аппаратура восприимчива к электромагнитным помехам. Это связано с уменьшением расстояния между функциональными узлами и большим разнообразием модулей разного назначения, что ухудшает электромагнитную обстановку [1]. Одним из опасных факторов являются кондуктивные синфазные и дифференциальные помехи. Для их ослабления применяются помехоподавляющие фильтры на основе пассивных компонентов с сосредоточенными параметрами [2]. Синфазный и дифференциальные дроссели занимают большое пространство в схеме помехоподавляю-

щего фильтра. Предлагается использовать комбинированный дроссель, способный работать в синфазном и дифференциальном режимах. Это позволяет минимизировать количество индуктивных компонентов и размеры помехоподавляющего устройства [3].

Цель работы – выполнить сравнительный анализ помехоподавляющих фильтров с различными вариантами компоновок индуктивных элементов.

На рис. 1 представлены три варианта компоновки индуктивных компонентов: классический, промежуточный и комбинированный. Индуктивные компоненты при классической компоновке помехоподавляющего фильтра расположены независимо: два дифференциальных дросселя $L_{DM1,\ DM2}$ установлены на выходе схемы, и синфазный дроссель L_{CM} установлен на входе схемы фильтра (рис. 1, *а*, *б*) [4, 5].

Промежуточная компоновка отличается конструкцией дифференциального дросселя L_{DM1}. Он выполнен на общем сердечнике двумя магнитосвязанными индуктивностями. Это позволяет незначительно уменьшить габариты и количество используемых компонентов (см. рис. 1, *в*, *г*) [6].

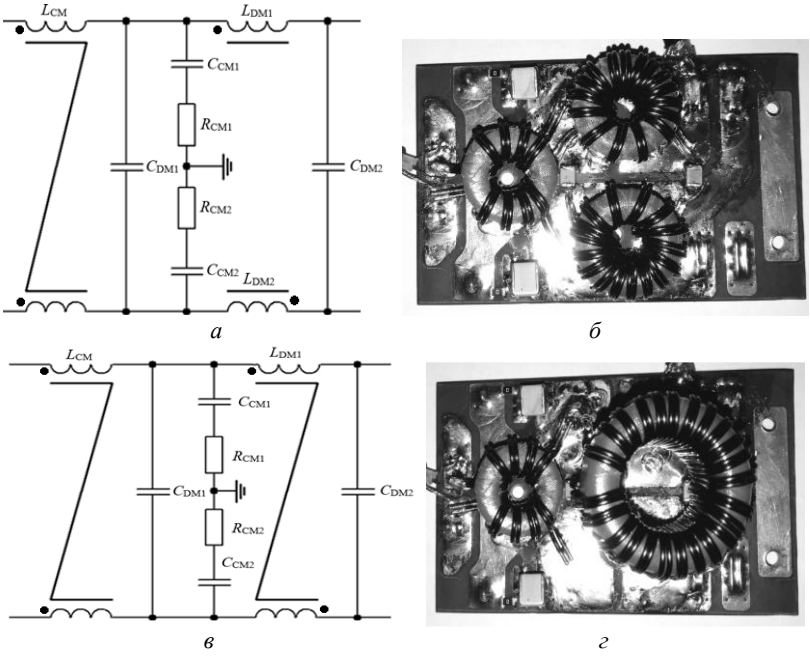
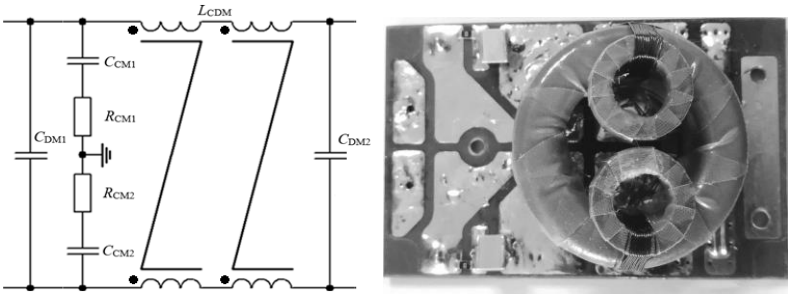


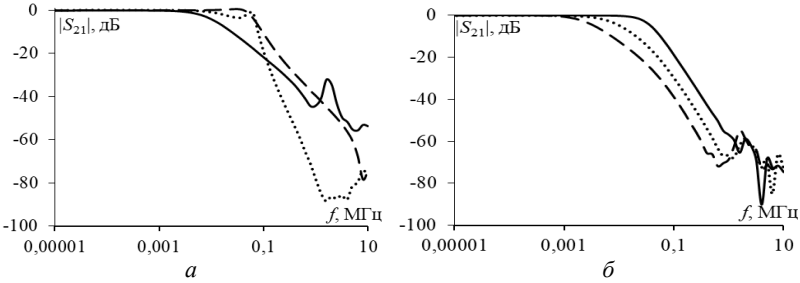
Рис. 1 (начало)



д *е*

Рис. 1 (окончание). Принципиальные схемы и макеты помехоподавляющих фильтров с различной компоновкой индуктивных компонентов

В комбинированной компоновке все индуктивные компоненты заменены одной конструкцией, которая является синфазно-дифференциальным дросселем. Данная конструкция реализована на связанных индуктивностях L_{CDM}, что позволяет значительно уменьшить количество используемых компонентов (см. рис. 1, *д*, *е*) [7]. Далее представлены результаты измерений, которые выполнены с помощью осциллографа Keysight EDUX1002G. На рис. 2 представлено сравнение частотных характеристик фильтров в синфазном (см. рис. 2, *а*) и дифференциальном (см. рис. 2, *б*) режимах работы. Значения частот среза и крутизны спада представлены в таблице.



а *б*

Рис. 2. Частотные зависимости $|S_{21}|$ для синфазного (*а*) и дифференциального (*б*) режимов работы фильтров классической (····), промежуточной (- -) и комбинированной (——) компоновок индуктивных компонентов

Из представленных результатов видно, что в синфазном режиме работы наименьшей частотой среза обладает фильтр с комбинированной компоновкой, а в дифференциальном режиме работы наименьшая частота среза у фильтра с промежуточной компоновкой. Необходимо отметить, что при замене индуктивных элементов принципиальная схема фильтра не менялась.

Значения частот среза и крутизны спада

Компоновка	Синфазный режим		Дифференциальный режим	
	Частота среза, кГц	Крутизна спада, дБ/дек	Частота среза, кГц	Крутизна спада, дБ/дек
Классическая	63,48	60	7,43	40
Промежуточная	55,24	40	2,14	40
Комбинированная	8,02	20	34,31	40

ЛИТЕРАТУРА

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – Note 41. – 8 July 2014.
2. Palego C. A Two-Pole Lumped-Element Programmable Filter with MEMS Pseudodigital Capacitor Banks / C. Palego, A. Pothier, A. Crunteanu, M. Chatras, P. Blondy, C. Champeaux, P. Tristant, A. Catherinot // IEEE Trans. on microwave theory tech. – 2008. – Vol. MTT-56, iss. 3. – P. 729–735.
3. Baskakova A.E., Turgaliev V.M., Kholodnyak D.V. A Tunable Lumped-Element Bandpass Filter with Independent Continuous Tuning of Center Frequency and Bandwidth. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. – 2016. – Vol. 3. – P. 25–32.
4. Zhechev Y.S. Electromagnetic interference filter for spacecraft power bus / Y.S. Zhechev, V.P. Kosteletskii, A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2019. – P. 2.
5. Berman, M. All about EMI filters. – San Diego, USA, 2008. – 3 p.
6. Richard L.O. EMI filter design / L.O. Richard, M.P. Timothy // CRC Press. – 2012. – 344 p.
7. Nan L. A common mode and differential mode integrated EMI filter / L. Nan, Y. Yugang // 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Shanghai, China, 2006. – 5 p.

УДК 621.391.31

СИЛОВАЯ ШИНА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С КОАКСИАЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

И.И. Николаев, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, nikolaev.727@yandex.ru

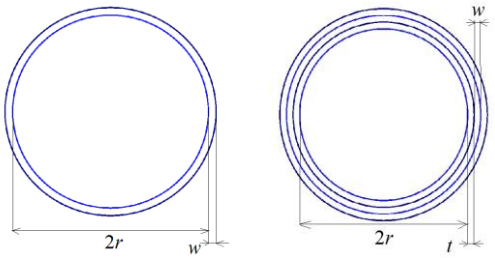
Выполнено вычисление погонных индуктивности и ёмкости для силовой шины электропитания с коаксиальным поперечным сечением при различном количестве и толщине стенок цилиндров.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, погонные параметры, численное моделирование.

Силовые шины электропитания (СШЭП) используются для передачи высокой мощности электроэнергии от источника к нагрузке. Одним из важных параметров при проектировании подобных конструкций является погонная индуктивность [1], которая оказывает существенное влияние на стабильную работу активных элементов, а её неучёт может привести к перенапряжению, падению напряжения, дисбалансу токов, резонансу в конденсаторах и т.д. [2]. Погонные индуктивность L и ёмкость C могут быть заданы оптимальной формой поперечного сечения СШЭП. Так, в работе [3] созданы различные модели поперечных сечений СШЭП и выполнен их квазистатический анализ. Минимизация погонной индуктивности достигалась за счет изменения геометрических параметров конструкций СШЭП. Другим способом уменьшения паразитных параметров является использование коаксиальных СШЭП. Особенностью подобной конструкции является отсутствие результирующего магнитного поля в окружении СШЭП, низкое значение погонной индуктивности, малые потери мощности электроэнергии от источника к нагрузке, высокая механическая и электрическая прочность (незначительное влияние вихревого тока и эффекта близости) [4]. Поэтому целесообразно провести более детальный анализ СШЭП с коаксиальным поперечным сечением.

Цель работы – выполнить анализ влияния толщины стенок и количества цилиндров коаксиальной СШЭП на её погонные параметры.

Исходными данными для вычисления погонных параметров СШЭП с коаксиальным поперечным сечением, являются: начальный радиус r = 1 мм, расстояние между цилиндрами w = 0,1 мм, толщина стенок цилиндров t = 0,1; 0,5; 1 мм, N – количество цилиндров, относительные магнитная μ_r и диэлектрическая ε_r проницаемости приняты равными 1 (рис. 1). Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались.



а *б*

Рис. 1. Поперечное сечение из двух цилиндров коаксиальной СШЭП с бесконечно тонкой (*а*) и конечной (*б*) толщинами t их стенок

В системе TALGAT созданы модели и выполнены вычисления погонных L и C для $N = 1, 2, \ldots, 10$.

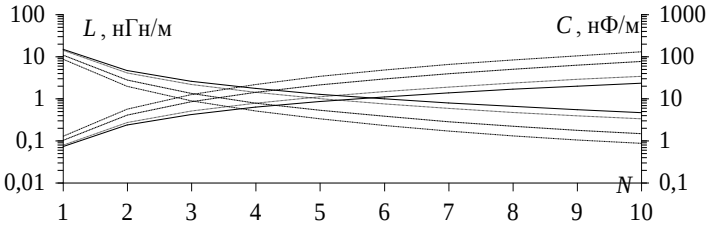


Рис. 2. Зависимости значений погонных L и C для коаксиальной СШЭП от количества цилиндров N: с бесконечно тонкой (—) и с конечной (t = 0,1 мм(---), t = 0,5 мм(– – –), t = 1 мм(– – –)) толщинами их стенок

Из рис. 2 видно, что при увеличении N погонная L уменьшается, а погонная C увеличивается. Так, для СШЭП с бесконечно тонкими стенками цилиндров при увеличении N значение погонной L уменьшилось с 15 до 0,47 нГн/м (в 32 раза), а значение погонной C наоборот увеличилось с 0,7 до 24 нФ/м (в 34 раза). Для СШЭП с конечной толщиной стенок цилиндров (t = 1 мм) при увеличении N значение погонной L уменьшилось с 8,6 до 0,86 нГн/м (в 10 раз), а значение погонной C увеличилось с 1,3 до 129 нФ/м (в 99 раз).

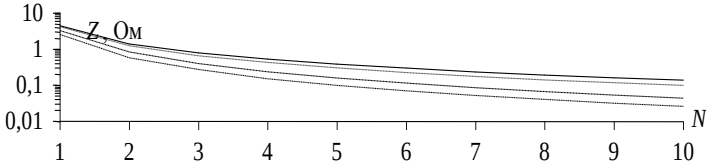


Рис. 3. Зависимость значений волнового сопротивления от количества цилиндров N для коаксиальной СШЭП: с бесконечно тонкой (—) и с конечной (t = 0,1мм(---), t = 0,5мм(– – –), t = 1мм(– – –)) толщинами их стенок

Из рис. 3 видно, что при увеличении N волновое сопротивление Z уменьшается. Так, для СШЭП с бесконечно тонкими стенками цилиндров значение Z уменьшилось с 4,5 до 0,14 Ом (в 32 раза), а для СШЭП с конечной толщиной (t = 1 мм) стенок цилиндров – с 2,6 до 0,26 Ом (в 10 раз).

Таким образом, показано, что увеличение количества цилиндров и толщины их стенок приводит к уменьшению погонной L и увеличе-

нию погонной C, что является положительным эффектом для применения их в качестве СШЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-51017.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dorneles A.C., Guo J. Bus bar design for high-power // IEEE Trans. On Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, Iss. 3. – P. 2354–2367.

2. Clavel E. Influence of the cabling geometry on paralleled diodes in a high power rectifier // IEEE Conf. Record of the Industry Applic. Conf. – 1996. – P. 993–998.

3. Ternov S., Demakov A.V., Komnatnov M.E. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies. – 2018. – P. 1–4.

4. Ehrich M. Lars Ole Fichte. Electric properties and magnetic field of coaxial bus bar // Asia-Pacific Conference on Environmental CEEM. – 2002. – P. 11–16.

УДК 621.391.825:378.3

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ ПО АНАЛИТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

Р.С. Суровцев, доцент, к.т.н.; А.В. Носов, ассистент, к.т.н.; Е.А. Сердюк, магистрант

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, surovtsevrs@gmail.com

Представлены первые результаты части исследований по гранту РФФИ «Научное наставничество» с научно-технологическим университетом «Сириус». Раскрыты аспекты их апробации в рамках практических занятий для магистрантов кафедры телевидения и управления ТУСУРа.

Ключевые слова: магистратура, электромагнитная совместимость, аналитические модели, сверхкороткий импульс.

Сегодня образовательный процесс в высшей школе тесно связан с нововведениями, направленными на улучшение его качества. Одним из основных источников новых знаний являются результаты научной работы преподавателей или студентов высшей школы. Результаты, полученные в ходе такой работы, могут быть использованы в образовательном процессе либо внести значительный вклад в развитие науки. Источниками финансирования зачастую являются различные фонды, содействующие в получении новых фундаментальных или поисковых научных знаний. Примечательно, что одним из обязатель-

ных условий победы в конкурсе грантов, проводимом этими фондами, является обязательное участие студентов в исследовании. Это позволяет студенту приобретать навыки исследовательской работы, а в дальнейшем пройти по пути магистрант–аспирант–докторант. Поэтому вклад науки в образовательный процесс неоценим.

Новые знания, полученные в результате выполнения студентами научно-исследовательской работы, обобщаются и апробируются, а в дальнейшем могут быть представлены в виде практических рекомендаций для проведения занятий со студентами. В результате научных исследований студент приобретает следующие навыки: способность самостоятельно формулировать цель и задачи исследования; способность составлять аналитический обзор по заданной тематике; представлять результаты исследования в виде отчетов; подготавливать публикации и заявки на получение патента на полезную модель или изобретение; проводить практические и лабораторные работы. Эти навыки позволяют подготовить магистранта к аспирантуре.

Цель данной работы – кратко пояснить процесс введения новых знаний в образовательный процесс на примере разработки методических указаний по проведению практического занятия у магистрантов, обучающихся по программе «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры», в ходе выполнения гранта РФФИ № 19-37-51017 «Моделирование распространения сверхкоротких импульсов в многопроводных линиях передачи для решения задач проектирования радиоэлектронной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости» в рамках конкурса «Научное наставничество» на 2020–2021 гг. Конкурс примечателен тем, что его основными исполнителями являются студенты и аспиранты, а также тем, что в течение трех месяцев каждого года проект должен выполняться на базе НТУ «Сириус» с проведением ряда мастер-классов и курса лекций по результатам реализации проекта для учащихся университета. Поэтому необходимо заранее приступить к выполнению работ и разработке концепции проведения занятий для студентов.

Одной из задач проекта является разработка новых, отличающихся представлением в замкнутом виде математических моделей для вычисления временного отклика новых устройств защиты на основе меандровых линий на воздействие сверхкороткого импульса (СКИ). Результаты ее решения уже успешно апробированы на практических занятиях магистрантов ТУСУРа по дисциплине «Модальные фильтры». Проведение практических занятий предполагается в несколько этапов: получение общих математических моделей для вычисления отклика в меандровой линии задержки [1] на основе известных мате-

матических моделей для связанной линии [2]; введение ограничений и получение математических моделей для частных случаев меандровой линии задержки в однородном и неоднородном диэлектрических заполнениях; апробация моделей путем сравнения откликов на воздействие СКИ, полученных на основе моделей и численными методами в программе TALGAT [3].

На первом этапе студенты ознакомились с математическими моделями для вычисления отклика в связанной линии, затем, используя соответствующие коэффициенты передачи и отражения, известные из теории, получили требуемые математические модели для расчета отклика в витке меандровой линии. На втором этапе оговаривались ограничения, поскольку эти модели применимы к частным случаям линий с симметричным относительно центра и опорного проводника поперечным сечением. На третьем этапе выполнено вычисление откликов линии на воздействие СКИ с помощью полученных математических моделей и в системе TALGAT. Результаты сравнивались между собой и выявлялось совпадение или отличие откликов и их причины.

Занятие проводилось для группы магистрантов, обучающихся по программе «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры». В процессе выполнения работы у студентов возник вопрос, связанный с непониманием состава модели: какие именно компоненты относятся к коэффициентам передачи на ближнем и дальнем концах линии, а какие к коэффициентам отражения. Получив ответ на данный вопрос, все студенты справились с заданием и получили положительные оценки. Занятие позволило магистрантам освоить материал дисциплины на реальной задаче и закрепить ранее полученные знания. Примечательно, что система TALGAT является отечественным программным продуктом для решения задач электромагнитного поля. Система проста для понимания пользователя и не требует существенных навыков в работе с САПР, что делает обучение более доступным и эффективным.

Таким образом, практические занятия с использованием впервые полученных математических моделей позволяют вводить в образовательный процесс новые и актуальные научные знания. Кроме того, будущими специалистами отрабатываются исследовательские навыки на примере решения задач электромагнитной совместимости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-51017 с научно-технологическим университетом «Сириус».

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналитические математические модели для вычисления временного отклика в витке меандровой линии / Е.А. Сердюк, А.В. Носов, Р.С. Суровцев,

Т.Р. Газизов // Матер. докладов XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 ноября 2019 г. – Томск: В-Спектр. – 2019. – Ч. 2. – С. 49–52.

2. Леонтьев Н.А. Анализ временного отклика в межсоединениях быстродействующих радиоэлектронных схем: дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2000.

3. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, А.О. Мелкозеров, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 2 (36). – С. 45–50.

УДК 519.612.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

А.Е. Максимов, аспирант каф. ТУ;
И.А. Онищенко, студент каф. КСУП
Научный руководитель С.П. Куксенко, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, mae@tusur.ru

Приведены результаты использования адаптивной перекрестной аппроксимации при анализе линий передачи методом моментов для уменьшения вычислительных затрат.

Ключевые слова: линия передачи, метод моментов, система линейных алгебраических уравнений, адаптивная перекрестная аппроксимация.

Линии передачи (ЛП) широко используются в СВЧ-технике и в межсоединениях цифровых устройств [1]. При анализе ЛП широко применяются квазистатический подход и различные численные методы. Их использование, как правило, сводит задачу к необходимости решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [2]. Из полученного решения вычисляются погонные параметры ЛП. При использовании метода моментов итоговая СЛАУ является плотной, и объем памяти, которым обладают современные персональные компьютеры (ПК), часто оказывается недостаточен для хранения таких матриц, поэтому существует необходимость в их сжатии [3], например, с использованием адаптивной перекрестной аппроксимации (adaptive cross approximation, ACA) [4]. Однако авторам неизвестны работы, в которых исследовано использование ACA при анализе ЛП.

Цель работы – исследование работы ACA при анализе ЛП методом моментов.

Исследование работы ACA выполнено на примере двухпроводной микрополосковой ЛП при трех порядках матрицы СЛАУ (N = 2079, 6227 и 10374), полученных последовательным учащением

сетки. При вычислениях исследовалось влияние точности аппроксимации (*tol*) и итерационного решения СЛАУ методом GMRES [5] (относительной нормы невязки, *TOL*) на конечный результат (емкостная матрица ЛП). Вычисление производились на ПК со следующими характеристиками: процессор – Intel Core i5-8265U, тактовая частота – 1,60 ГГц; объем ОЗУ – 8 Гбайт; количество ядер – 4; количество виртуальных процессоров – 8.

На рис. 1, *а* приведена емкостная матрица (**C**), полученная при решении СЛАУ методом Гаусса. В таблице для случая $N = 6227$ приведены требуемые для вычисления емкостной матрицы $\mathbf{C}'$ затраты времени (T') и машинной памяти (V') при использовании ACA и GMRES при разных значениях *TOL* и *tol* относительно аналогичных затрат при использовании метода Гаусса ($T = 3{,}15$ с и $V = 296$ Мб), а также относительная погрешность решения $\Delta = \|\mathbf{C}' - \mathbf{C}\| / \|\mathbf{C}\|$.

$$\mathbf{C} = \begin{vmatrix} 132{,}00 & -23{,}09 \\ -23{,}09 & 132{,}00 \end{vmatrix} \quad а$$

$$\mathbf{C}' = \begin{vmatrix} 133{,}09 & -22{,}99 \\ -23{,}01 & 133{,}15 \end{vmatrix} \quad б$$

$$\mathbf{C}' = \begin{vmatrix} 132{,}02 & -22{,}96 \\ -22{,}99 & 132{,}03 \end{vmatrix} \quad в$$



г

Рис. 1. Емкостные матрицы, полученные при решении СЛАУ с $N = 6227$ методом Гаусса (*а*), ACA и GMRES при $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-3}$ (*б*) и $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-4}$ (*в*), и портрет матрицы при $tol = 10^{-3}$, $TOL = 10^{-4}$ (*г*)

Из таблицы видно, что на экономию времени вычисления в большей степени влияет значение параметра *TOL*. Так, при $TOL = 10^{-3}$ (для всех *tol* ниже 10^{-1}) экономия составляет около 1,6 раза. При этом точность емкостной матрицы высока (см. рис. 1, *б*). Большая точность достигается при $TOL = 10^{-4}$ (см. рис. 1, *в*), но экономия времени в этом случае отсутствует. Однако увеличение N до 10374 при этом значении *TOL* также приводит к экономии времени около 1,6 раза.

Затраты машинной памяти при использовании ACA практически не зависят от значения *tol* (см. таблицу). При этом увеличение N ведет к увеличению экономии машинной памяти. Так, при $N = 2079$ она составляет до 4,8 раза, при $N = 6227$ – до 5,3 раза, а при $N = 10374$ – до 5,5 раза. Также из таблицы видно, что погрешность решения $\Delta \approx 10^{-3}$ достигается при $TOL = 10^{-4}$ и $tol = 10^{-3}$. Поэтому дальнейшее уменьшение этих параметров нецелесообразно.

Для наглядности итоговый портрет матрицы СЛАУ при использовании АСА для N = 6227 приведен на рис. 1, *г* (серым отмечены блоки, хранящиеся в несжатом виде, черным – в сжатом виде). При других N различия в портретах минимальны.

Погрешность вычисления емкостной матрицы и затраты времени и машинной памяти при использовании АСА и GMRES относительно метода Гаусса для N = 6227

tol	*TOL*	*V*/*V′*	*T*/*T′*	Δ
10^{-1}	10^{-1}	5,34	3,74	0,26524
	10^{-2}	5,34	2,58	0,11528
	10^{-3}	5,34	1,16	0,05121
	10^{-4}	5,34	0,85	0,05042
	10^{-5}	5,34	0,59	0,05019
10^{-2}	10^{-1}	5,26	3,48	0,28322
	10^{-2}	5,26	2,65	0,12668
	10^{-3}	5,26	1,65	0,01168
	10^{-4}	5,26	1,01	0,00146
	10^{-5}	5,26	0,71	0,00099
10^{-3}	10^{-1}	5,20	3,53	0,28386
	10^{-2}	5,20	2,58	0,12703
	10^{-3}	5,20	1,69	0,01129
	10^{-4}	5,20	1,00	0,00129
	10^{-5}	5,20	0,65	0,00078
10^{-4}	10^{-1}	5,13	3,30	0,28389
	10^{-2}	5,13	2,46	0,12716
	10^{-3}	5,13	1,62	0,01061
	10^{-4}	5,13	0,96	0,00057
	10^{-5}	5,13	0,71	0,00007

Таким образом, при анализе ЛП использование АСА является эффективным средством экономии машинной памяти, а также часто и затрат времени.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2020-0039 Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А.Н. Системы параметров одинаковых связанных линий с неуравновешенной электромагнитной связью / А.Н Сычев, С.М. Стручков // Доклады ТУСУР. – 2014. – Т. 1. – С. 39–50.

2. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2013. – 430 с.

3. Shaeffer J. Million plus unknown MOM LU factorization on a PC // IEEE International conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). – 2015. – P. 62–65.

4. Bebendorf M. Approximation of boundary element matrices // Numerische Mathematik. – 2000. – Vol. 86. – P. 565–589.

5. Saad Y. GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving non-symmetric linear systems / Y. Saad, M.H. Schultz // SIAM Journal on scientific and statistical computing. – 1986. – Vol. 7. – P. 856–869.

УДК 621.372.21

КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КОНЦАХ ПАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ

А.А. Синельников, студент каф. ТУ; А.В. Чуб, студент каф. РСС; Е.С. Жечев, аспирант каф. ТУ, м.н.с. НИЛ «ФИЭМС»

Научный руководитель А.М. Заболоцкий, проф. каф. ТУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, geopath@mail.ru

Анализируется конфигурация четырехслойного зеркально-симметричного модального фильтра (МФ) с различными граничными условиями на ближнем и дальнем концах пассивных проводников. Представлены результаты квазистатического моделирования во временной и частотной областях. Моделирование выполнено с учетом потерь.

Ключевые слова: зеркально-симметричный модальный фильтр, помехозащитные устройства, электромагнитная совместимость, сверхкороткий импульс

В настоящее время при проектировании сложных радиоэлектронных устройств и систем большое внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости. В процессе работы высокочастотная передающая и высоковольтная коммутационная аппаратуры способны генерировать излучаемые и кондуктивные помехи. Особо опасным видом помех является сверхкороткий импульс (СКИ) [1], который обладает большой мощностью и широким спектром. Традиционные помехоподавляющие устройства оказываются малоэффективными в борьбе с СКИ из-за ограниченного частотного диапазона, низкого быстродействия и малой рассеиваемой мощности. Перспективными устройствами защиты от импульсов малой длительности являются модальные фильтры (МФ) [2]. В основу работы таких устройств положен принцип модального разложения. Принципиаль-

ная и структурная схемы четырехслойного зеркально-симметричного МФ представлены на рис. 1. Проведен ряд исследований такого устройства [3, 4], однако анализ влияния граничных условий пассивных проводников (*R*2, *R*3, *R*4, *R*6, *R*7, *R*8) на характеристики четырехслойного зеркально-симметричного МФ не был выполнен. Цель данной работы – провести такое исследование.

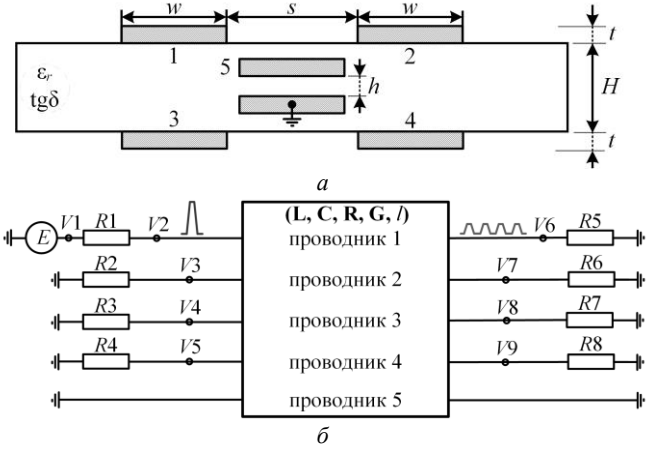


Рис. 1. Принципиальная схема зеркально-симметричного МФ

Для выполнения условий разложения выбраны следующие параметры [3]: ширина проводников w = 1 мм, расстояние между проводниками s = 0,7 мм, толщина проводников t = 35 мкм, расстояние между внутренними проводниками h = 0,51 мм, толщина диэлектрика H = 1 мм, ε_r = 4,3, tgδ = 0,025 (приведены для частоты 1 МГц). Квазистатическое моделирование проводилось с учетом потерь в проводниках и диэлектрике в системе TALGAT. Минимальная длина сегмента исследуемой структуры 7 мкм. В качестве входного воздействия подавался трапециевидный импульс с длительностью фронта, спада и плоской вершины 100 пс, а значение амплитуды равно 2 В (*V*1).

Частотная зависимость $|S_{21}|$ и отклик во временной области приведены на рис. 2. Максимальные значения амплитуд импульсов на выходе МФ и полоса пропускания сведены в таблицу.

Из результатов моделирования видно, что в частотной области изменение граничных условий на концах пассивных проводников четырехслойного зеркально-симметричного МФ приводит к изменению частоты первого резонанса и появлению дополнительных резонансов.

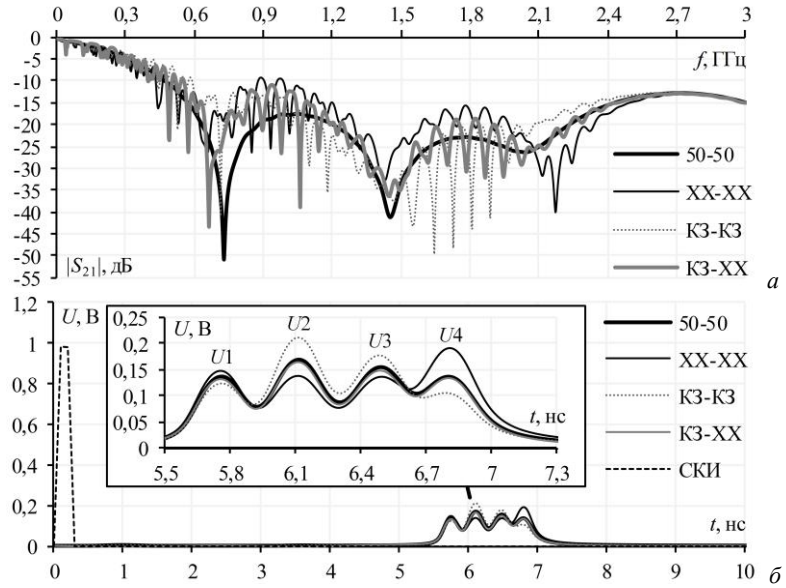


Рис. 2. Частотная зависимость $|S_{21}|$ (*а*) и отклик во временной области (*б*) четырехслойного зеркально-симметричного МФ**Значения амплитуд импульсов на выходе МФ в узле *V*6 и частот среза**

Параметр	50-50	XX-XX	КЗ-КЗ	КЗ-XX
*U*1, В	0,136	0,147	0,123	0,131
*U*2, В	0,168	0,137	0,211	0,164
*U*3, В	0,154	0,136	0,177	0,148
*U*4, В	0,136	0,191	0,104	0,133
f_c, МГц	201	153	161	40

Наибольшее значение частоты среза (201 МГц) получено при условии 50-50, а наименьшее (40 МГц) – при КЗ-XX. Результаты во временной области показали, что изменились амплитуды импульсов разложения. Максимальное значение амплитуды разложенного импульса 0,211 В достигается при условии КЗ-КЗ. Для подтверждения полученных результатов целесообразно проведение экспериментального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources, System and assessment notes. Note 41, 8 July 2014.

2. Gazizov A.T., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 1136–1142.

3. Жечев Е.С. Влияние перемычек в опорном проводнике на характеристики зеркально-симметричного модального фильтра // Сб. избранных статей научной сессии ТУСУР по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», 2019, 22–24 мая. – С. 279–281.

4. Жечев Е.С., Черникова Е.Б., Белоусов А.О., Газизов Т.Р. Экспериментальные исследования зеркально-симметричного модального фильтра во временной и частотной областях // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 162-179. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10208

УДК 621.372.211

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА АМПЛИТУДУ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПАРЕ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ

И.А. Скорняков, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель Р.С. Суровцев, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ivan_sk94@mail.ru

Выполнен анализ влияния параметров влагозащитного покрытия на амплитуду перекрестных наводок в паре связанных линий на основе анализа четверти суммы емкостной и индуктивной связей между проводниками линии и половины разности этих коэффициентов. Такой подход позволяет получить предварительные оценки на раннем этапе моделирования без вычисления временного отклика. В результате работы выявлены комбинации параметров поперечного сечения, обеспечивающие компенсацию дальней перекрестной наводки в паре связанных линий.

Ключевые слова: пара связанных линий, влагозащитное покрытие, перекрестная наводка.

На сегодняшний день радиоэлектронная аппаратура (РЭА) стала неотъемлемым компонентом практически всех сфер деятельности человека. Плотность монтажа и интеграции современных печатных плат РЭА неуклонно возрастает, что наряду с уменьшающимися амплитудами операционных сигналов ведет к уменьшению запаса помехозащищенности РЭА. Поэтому важно обеспечение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) печатных плат РЭА. Одной из задач ЭМС являются анализ и компенсация перекрестных наводок в многопроводных межсоединениях печатных плат. Отсюда возникает необходимость разработки новых методов компенсации перекрестных

наводок. Одним из подходов является изменение диэлектрического заполнения линии, например за счет нанесения дополнительного слоя с оптимальными параметрами на поверхность печатной платы [1]. Примечательно, что данный подход позволяет уменьшить уровень перекрестных наводок на самом последнем этапе проектирования без изменения трассировки печатной платы и внесения дополнительных компонентов.

Однако данный подход не исследован системно и не представлен в виде конечной методики компенсации уровней наводок. Первым шагом в разработке данной методики является анализ влияния изменения параметров покрывающего слоя на изменение амплитуды перекрестных наводок в паре связанных линий. Примечательно, что уровень ближней перекрестной наводки (V_{NE}) в паре связанных линий пропорционален четверти суммы емкостной (K_C) и индуктивной (K_L) связей между проводниками линии (K_{NE}), а на дальнем (V_{FE}) – половине их разности (K_{FE}). Коэффициенты K_C и K_L вычисляются по следующим выражениям [2]:

$$K_C = -\frac{C_{12}}{C_{11}},\ K_L = \frac{L_{12}}{L_{11}},$$

где C_{11}, C_{12} и L_{11}, L_{12} – элементы матриц коэффициентов электростатической (матрица **C**) и электромагнитной (матрица **L**) индукции соответственно.

Цель данной работы – выполнить анализ влияния параметров влагозащитного покрытия на коэффициенты K_C, K_L, K_{NE} и K_{FE}.

На рис. 1 представлено поперечное сечение пары связанных линий с покрывающим диэлектрическим слоем и без него. Параметры поперечного сечения выбраны следующими: ширина проводника w = 400 мкм, толщина проводника t = 35 мкм, расстояние между проводниками s = 400 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость основы ε_{rT} = 4,5, толщина слоя основы h = 1000 мкм, расстояние от края структуры до проводника d = 3w. Относительная диэлектрическая проницаемость покрытия (ε_v) и толщина (h_v) покрывающего слоя варьировались в диапазоне 10–200 мкм с шагом 10 мкм и 1–10 с шагом 1 соответственно.

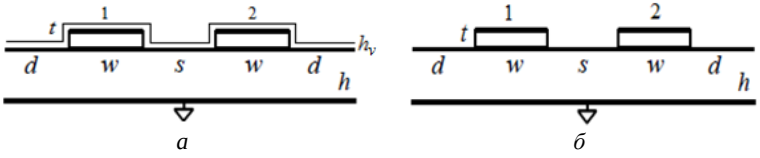


Рис. 1. Поперечное сечение линии с покрывающим слоем (*а*) и без покрывающего слоя (*б*)

Выполнено вычисление коэффициентов K_C, K_L, K_{NE} и K_{FE} для случая без покрытия и случая с покрывающим слоем в диапазоне его параметров. Полученные результаты сведены в таблицу. С целью экономии места в таблицу сведены результаты лишь для крайних точек диапазона изменения толщины покрывающего слоя.

Сначала рассмотрим влияние параметров влагозащитного покрытия на изменения K_C и K_L. Из таблицы видно, что увеличение h_0 неуклонно ведет к увеличению K_C, при этом рост коэффициента в отличие от случая без покрытия при h_0 = 10 мкм составляет 1,7 и 1,84 раза для ε_v = 2 и 10, а при h_v = 200 мкм – 1,96 и 2,7 раза соответственно. Значение коэффициента K_L остается неизменным для всех рассмотренных случаев, поскольку элементы матрицы **L** вычисляются при воздушном заполнении.

Значения коэффициентов связи при разных ε_v и h_v

h_v, мкм	K_C	K_L	K_{NE}	K_{FE}
без покрытия				
	0,3071	0,3701	0,1693	–0,0315
	ε_v =2			
10	0,3178	0,3701	0,1719	–0,0263
200	0,3423		0,1781	–0,0139
ε_v =3				
10	0,3252	0,3701	0,1738	–0,0224
200	0,3711		0,1853	0,0005
ε_v =4				
10	0,3319	0,3701	0,1755	–0,0191
200	0,3959		0,1915	0,0128
ε_v =5				
10	0,3380	0,3701	0,1771	–0,0160
200	0,4176		0,1969	0,0237
ε_v =6				
10	0,3438	0,3701	0,1784	–0,0131
200	0,4371		0,2018	0,0334
ε_v =7				
10	0,3492	0,3701	0,1798	–0,0105
200	0,4545		0,2062	0,04219
ε_v =8				
10	0,3543	0,3701	0,1811	–0,0079
200	0,4704		0,2101	0,0501
ε_v =9				
10	0,3592	0,3701	0,1823	–0,0054
200	0,4849		0,2138	0,0573
ε_v =10				
10	0,3640	0,3701	0,1835	–0,0030
200	0,4982		0,2171	0,0640

Далее рассмотрим влияние h_v и ε_v на изменение коэффициентов K_{NE} и K_{FE}. Зависимость коэффициента K_{NE} схожа по характеру с зависимостью K_C, поскольку K_{NE} вычисляется как четверть суммы K_C и K_L. Таким образом, наблюдается увеличение K_{NE} как при увеличении h_v, так и ε_v. Рост коэффициента K_{NE} в отличие от случая без покрытия при $h_v = 10$ мкм составляет 1,6 и 1,7 раза для $\varepsilon_v = 2$ и 10, а при $h_0 = 200$ мкм – 1,65 и 2 раза соответственно. Таким образом, введение покрывающего диэлектрического слоя приводит к росту амплитуды перекрестных наводок на ближнем конце линии. Наибольший интерес представляет влияние параметров покрывающего слоя на изменение коэффициента K_{FE}. Видно, что при $h_v = 10$ мкм K_{FE} имеет отрицательное значение и уменьшается в 1,1 раза (от –0,0263 до –0,0030) по сравнению со случаем без покрытия при увеличении ε_v от 2 до 10. При $h_v = 200$ мкм значение K_{FE} меняется неоднозначно: меняет знак (с отрицательного на положительный) при $\varepsilon_v = 3$ для результатов из таблицы, после чего возрастает, а его рост составляет более чем в 4,5 раза. Таким образом, существуют комбинации параметров, при которых значение коэффициента K_{FE} близко к нулю (перекрестная наводка на дальнем конце имеет нулевую амплитуду). Такая ситуация возникает, когда значения коэффициентов K_C и K_L имеют равные значения. В результате проделанной работы выявлены такие комбинации: $h_v = 200$ мкм и $\varepsilon_v = 3$, $h_v = 100$ мкм и $\varepsilon_v = 4$, $h_v = 50$ мкм и $\varepsilon_v = 6$.

Таким образом, в работе выполнена оценка влияния параметров влагозащитного покрытия на коэффициенты K_C, K_L и K_{NE}, K_{FE}, а также выявлены комбинации параметров, когда значение K_{FE} близко к нулю. Между тем выявлено, что K_{NE} имеет более чем в 3,5 раза большее значение, чем K_{FE}. Однако амплитуда наводки на дальнем конце помимо K_{FE} также пропорциональна длине линии, поэтому в линиях с большей длиной ситуация может быть обратной. Следующим этапом работы целесообразен многовариантный анализ влияния параметров влагозащитного покрытия на перекрестные наводки в межсоединениях реальных печатных плат, а также экспериментальные исследования.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования (проект FEWM-2020-0041).

ЛИТЕРАТУРА

1. Суровцев Р.С. Вычислительные алгоритмы, методики и рекомендации для проектирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата с учетом электромагнитной совместимости: дис. ... канд. тех. наук : 05.12.04. – Томск: ТУСУР, 2016. – 248 с.

2. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 212 с.

УДК 621.37

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Е.С. Варзин, магистрант; А.В. Носов, ассистент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, woodoo2013@gmail.com

Выполнены обзор технологических возможностей производителей печатных плат и оптимизация меандровой микрополосковой линии задержки с учетом реальных геометрических параметров поперечного сечения. Получено разложение сверхкороткого импульса в одном витке меандровой микрополосковой линии задержки с реальными параметрами поперечного сечения. Получено ослабление СКИ в 2,4 раза.

Ключевые слова: меандровая линия, сверхкороткий импульс, технологические возможности изготовителей печатных плат.

Актуальной задачей электромагнитной совместимости (ЭМС) является защита радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от сверхкоротких импульсов (СКИ). Однако существующие традиционные устройства неспособны обеспечить должную защиту от СКИ в силу своих недостатков, таких как малая мощность или недостаточное быстродействие, а также из-за полупроводниковых компонентов в их составе, они в большой степени подвержены влиянию радиации [1]. Поэтому примечательны исследования, в которых показано, что в меандровой микрополосковой линии (МПЛ) задержки из одного и двух витков возможно разложение СКИ на последовательность импульсов меньшей амплитуды [1]. В случае с линией из одного витка СКИ раскладывается на импульсы перекрестной наводки, нечетной и четной мод. Для этого необходимо обеспечить следующее условие [1]:

$$\tau_{max} = 2\tau_{min}, \quad (1)$$

где τ_{max} и τ_{min} – максимальное и минимальное значения из погонных задержек мод линии.

Однако для последующего изготовления печатной платы (ПП) с макетом меандровой МПЛ, параметры которой обеспечивают выполнение условия (1), необходим учет технологических возможностей изготовителей ПП.

Цель работы – оптимизация меандровой микрополосковой линии задержки из одного витка с учетом реальных геометрических параметров ее поперечного сечения.

Для этого необходимо выполнить обзор технологических возможностей производителей ПП, построить схему и поперечное сече-

ние меандровой микрополосковой линии, задать воздействие и выполнить оптимизацию параметров поперечного сечения с учетом технологических возможностей производителей ПП.

При выборе изготовителя для производства ПП с макетом защитной меандровой МПЛ ключевыми параметрами являются: максимальные габариты платы, минимальная ширина проводника (w_{min}), минимальное расстояние между проводниками (s_{min}), максимальная толщина проводника (t_{min}), используемые материалы, а также толщина диэлектрической подложки (h_{max}).

Проведен анализ технологических возможностей следующих производителей ПП: PCB Technology, АКСИОН, А-КОНТРАКТ, ApexPCB, PCB Element, PCBPRO, PS ELECTRO, НПО Марс, SMT service и др. Производители ПП с подходящими технологическими возможностями представлены в табл. 1.

Таблица 1

Выбранные производители ПП и их технологические возможности

Производитель	w_{min}, мкм	s_{min}, мкм	h_{max}, мкм	t_{max}, мкм
PCB Technology	38	38	1500	420
АКСИОН	50	50	–	300
А-КОНТРАКТ	50	50		200
ApexPCB	75	75		210

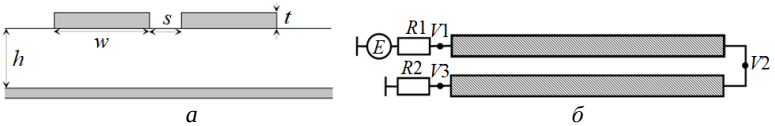
Отметим, что производители ПП из табл. 1 используют материалы со значениями относительной диэлектрической проницаемости (ε_r) не более 10,2. Этого недостаточно для выполнения условия (1). Однако имеются производители ПП, изготавливающие диэлектрические подложки, ε_r которых достигает 100. Но такие производители не подходят по параметрам w, s, h и t. Тогда возможна комбинация оптимальных параметров сразу нескольких производителей. Производители ПП [3, 4], изготавливающие подложки с большими значениями ε_r, представлены в табл. 2. Максимальные габариты подложки, которые могут обеспечить эти производители, составляют 60×48×2,5 мм.

Таблица 2

Производители ПП, изготавливающие подложки с большими значениями ε_r

Произв.	АО «ЦКБ РМ»						ООО «КЕРАМИКА»					
Материал	МТ-15	МТ-20	БА-35	МТ-60	МТ-90	СТП-130	Д10	В20	В40	В80	В92	В100
ε_r	15	20	35	60	70	130	9,7	20	42	80	92	100

Поперечное сечение витка меандровой МПЛ и её схема соединения представлены на рис. 1. В качестве воздействия выбран СКИ в форме трапеции со следующими параметрами: амплитуда ЭДС 1 В, длительность плоской вершины 100 пс, а фронта и спада – по 50 пс.



а *б*

Рис. 1. Поперечное сечение меандровой МПЛ (*а*) и ее схема соединений (*б*)

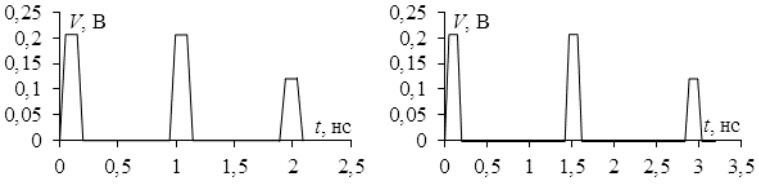
В результате оптимизации параметров поперечного сечения меандровой МПЛ с учетом технологических возможностей изготовителей ПП найдены два набора оптимальных параметров. Первый набор: w = 2000 мкм, s = 38 мкм, t = 420 мкм, h = 1600 мкм, ε_r = 35, l = 60 мм. Второй набор: w = 345 мкм, s = 38 мкм, t = 360 мкм, h = 500 мкм, ε_r = 100, l = 60 мм.

Вычислены матрицы погонных коэффициентов электростатической (**C**) и электромагнитной (**L**) индукций исследуемой линии с первым и вторым набором параметров соответственно:

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} 1004,71 & -492,828 \\ -492,828 & 1004,71 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м}, \quad \mathbf{L}=\begin{bmatrix} 262,352 & 221,093 \\ 221,093 & 262,352 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м}.$$

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix} 1890,41 & -924,107 \\ -924,107 & 1890,41 \end{bmatrix}, \text{ пФ/м}, \quad \mathbf{L}=\begin{bmatrix} 314,625 & 264,885 \\ 264,885 & 314,625 \end{bmatrix}, \text{ нГн/м}.$$

Используя **C** и **L**, вычислены погонные задержки четной и нечетной мод по выражению из [2]. Для первого набора параметров τ_e = 15,731 нс, τ_o = 7,86 нс, а для второго τ_e = 23,66 нс, τ_o = 11,83 нс. При этом условие (1) выполняется как при первом, так и при втором наборах параметров. На рис. 2 представлены формы сигнала на выходе витка меандровой МПЛ с первым и вторым наборами параметров.



а *б*

Рис. 2. Формы сигнала на выходе витка МПЛ с первым (*а*) и вторым (*б*) наборами параметров

Из рис. 2 видно, что амплитуда перекрестной наводки и нечетной моды в конце линии с первым и вторым наборами параметров равна 0,207 В, а амплитуда четной моды – 0,122 В. Это связано с тем, что при выполнении условия (1) на импульс четной моды накладывается отраженный импульс нечетной моды отрицательной полярности.

Таким образом, выполнен обзор технологических возможностей производителей ПП. С учетом технологических возможностей производителей ПП получены два набора параметров поперечного сечения меандровой МПЛ. Ослабление СКИ в линии как с первым, так и со вторым наборами параметров составило 2,4 раза (относительно *E*/2).

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации МД-2652.2019.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов А.В. Совершенствование защиты радиоэлектронной аппаратуры от сверхкоротких импульсов за счет меандровых линий задержки: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Томск, 2018. – 185 с.

2. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.

3. АО «ЦКБ РМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ckbrm.ru/index.php?page=37 (дата обращения: 18.02.2020).

4. ООО «КЕРАМИКА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ckbrm.ru/index.php?page=37 (дата обращения: 18.02.2020).

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

*Председатель – **Туев В.И.**, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Солдаткин В.С.**, доцент. каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

УДК 621.32

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО НАПРЯЖЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ НИТИ

К.Н. Афонин, аспирант каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Описан результат построения математической модели напряжения светодиодного излучающего элемента (СИЭ) в зависимости от температуры и силы тока. Для построения модели использовались классические методы математической статистики и проведения эксперимента.
Ключевые слова: светодиодный излучающий элемент, тепловое моделирование, математическая статистика, LED Filament.

На режим работы и срок службы светодиодного элемента напрямую влияет его рабочая температура [1, 2]. При работе устройства в условиях повышенных температур увеличивается вероятность его перегрева и преждевременного выхода из строя. Во избежание перегрева СИЭ в светодиодной филаментной лампе применяют различные методы для увеличения теплоотвода от источников тепла – светодиодных кристаллов на основе InGaN/GaN [3, 4]. Однако на практике сложно оценить эффективность применяемых методов отвода тепла, так как измерить температуру СИЭ внутри герметичной стеклянной колбы лампы затруднительно. С одной стороны, большая часть тепловизионных камер позволяет определить температуру только на поверхности колбы лампы, потому что стекло колбы является непрозрачным в среднем инфракрасном диапазоне. С другой стороны, нет возможности измерить температуру СИЭ с помощью термопары, потому что, разгерметизировав светодиодную лампу, заполняющий колбу гелий улетучится. В монографии Ф. Шуберта [5] упоминается метод косвенного измерения температуры светодиода по прямому напряжению. Чтобы оценить возможность использования метода для определения температуры СИЭ в светодиодной лампе, необходимо провести ряд опытов и построить математическую модель процесса.

Цель работы – построить математическую модель изменения прямого напряжения СИЭ в зависимости от изменения температуры.

Задачи:

– поставить эксперимент;

– провести математическую обработку результатов, использую классические методы математической статистики.

Экспериментальная установка состоит из СИЭ, расположенного на элементе Пельтье. К СИЭ прикреплена термопара. Для питания и измерения напряжения СИЭ был использован источник-измеритель Keithley 2410.

В ходе эксперимента было проведено три серии измерений напряжения на СИЭ для температур 0, 25, 85 °С при токе от 1 до 14 мА. Нагревание и охлаждение СИЭ происходило в выключенном режиме. Для исключения саморазогрева светодиодного источника проводилось измерение значений напряжения без достижения теплового равновесия.

Математическая обработка результатов эксперимента. Значимость влияния выбранных факторов на результирующий показатель в математической статистике подтверждается методом дисперсионного анализа [6].

Выходной параметр (прямое напряжение) формируют два фактора – сила тока и температура. Следовательно, выбран и выполнен двухфакторный дисперсионный анализ. В результате расчёта по формулам [6], получены оценки дисперсий для двух выбранных ранее факторов, силы тока S_I^2 и для температуры S_T^2, и оценку дисперсии совокупности случайных факторов ($S_{\text{сл}}^2$), которые могли повлиять на процесс. Затем для проверки применяют односторонний критерий Фишера (1). Если влияние факторов значимо, то выполняются следующие неравенства:

$$\frac{S_I^2}{S_{\text{сл}}^2} > F_{q1}; \quad \frac{S_T^2}{S_{\text{сл}}^2} > F_{q2}, \tag{1}$$

где, F_{q1}, F_{q2} – табличные значения, рассчитываемые по известным параметрам проведения эксперимента.

В результате анализа были получены неравенства, подтверждающие значимость факторов:

$$(33{,}43/0{,}014) > 3{,}37; \quad (25{,}92/0{,}014) > 2{,}15.$$

Следующим шагом к построению математической модели исследуемой зависимости стало выполнение регрессионного анализа. Цель регрессионного анализа – определить коэффициенты в уравнении (па-

раметры), описывающем какой-либо процесс. Для этого строится линейное уравнение (2), содержащее свободный член и сумму произведений факторов с неизвестными коэффициентами:

$$F(x, \beta) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_n x_n + \varepsilon, \quad (2)$$

где β – параметры модели; x – факторы, влияющие на процесс; ε – случайная погрешность уравнения.

Для нашего процесса получено уравнение с двумя факторами, коэффициенты которого были найдены методом наименьших квадратов (3):

$$U(I, T) = 74{,}62 + 0{,}26\, I - 0{,}035\, T, \quad (3)$$

где U – напряжение, В; I – сила тока, мА; T – температура, °С.

Оценка адекватности модели проводилась при помощи оценки коэффициента детерминации R^2. Чем ближе значения R^2 к 1, тем большую долю дисперсии результирующего показателя (величины $F(x, y)$ объясняет модель регрессии. Иными словами, точность модели тем выше, чем ближе к 1 параметр R^2. Для уравнения (3) $R^2 = 0{,}948$.

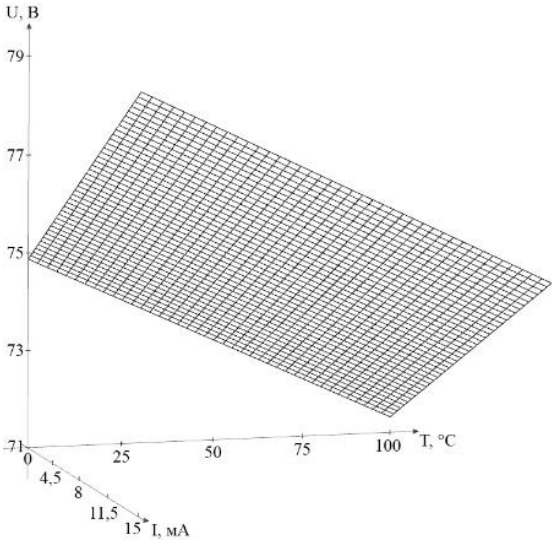


Рис. 1. График зависимости $U(I, T)$

Выводы. Проведённая математическая обработка результатов эксперимента подтвердила наличие линейной зависимости между температурой и напряжением СИЭ. Полученная математическая модель зависимости является адекватной. С её помощью возможно рассчитать температуру устройства, зная прямое напряжение и силу тока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-11018/19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонин М. Спасительная прохлада, или теплоотвод для мощных светодиодных матриц [Электронный ресурс] // Новости электроники + светотехника. – 2013. – № 2. – Режим доступа: https://www.compel.ru (дата обращения: 30.01.2020).

2. Тукшаитов Р. Как обеспечить заявленный срок службы светодиодных ламп / Р. Тукшаитов, Исыхакэфу // Полупроводниковая светотехника. – 2016. – № 3. – С. 8–11.

3. Feng W. Simulation and Optimization on Thermal Performance of LED Filament Light Bulb / W. Feng, B. Feng, F. Zhao, B. Shieh, R. Lee // Proceedings of the 12th China International Forum on Solid State Lighting (SSLCHINA 2015). – 2015. – Vol. 12. – P. 88–92.

4. Starosek D. Dependence on gas of the thermal regime and the luminous flux of LED filament lamp / D. Starosek, A. Khomyakov, K. Afonin, Y. Ryapolova, V. Tuev // AIP Confer-ence Proceedings Prospects of fundamental sciences develop-ment (pfsd-2016): proceedings of the xiii international confer-ence of students and young scientists aip conf. Proc. 1772, 060008 (2016).

5. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

6. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2016. – 113 с.

УДК 538.95

ДНК-МИКРОЧИП, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ПЕЧАТНЫМ МЕТОДОМ

[1]А.П. Шкарупо, ассистент; В.И. Туев, проф., д.т.н., И.Ю. Буханцов, аспирант каф. РЭТЭМ;
[2]Д.И. Жигалина, н.с. лаб. геномики орфанных болезней
г. Томск, [1]ТУСУР; [2]НИИ медицинской генетики, Томский НИМЦ
schkarupo.anastasia@yandex.ru

Представлены результаты определения пространственных параметров ДНК-микрочипа, изготовленного методом струйной печати.
Ключевые слова: печать, ДНК, матрица, ДНК-микрочип, профилометр, микроплоттер.

Для выявления числовых хромосомных аномалий у человека в настоящее время используют ДНК-микрочипы. Проведение генетического тестирования с помощью ДНК-микрочипа во многих случаях является необходимым условием для успешной диагностики хромосомного дисбаланса [1]. Применение ДНК-микрочипов актуально для

преимплантационной и пренатальной генетической диагностики, так как с ее помощью можно снизить вероятность рождения ребёнка с такими хромосомными патологиями, как синдромы Дауна, Эдвардса, Патау, Кляйнфельтера, Шерешевского–Тернера.

ДНК-микрочип представляет собой стеклянную подложку, на которую в определённом порядке нанесены фрагменты ДНК (ДНК-зонды) с известной последовательностью. Предварительно ДНК исследуемого образца фрагментируется и метится флуоресцентным красителем, аналогичная процедура проводится для ДНК контрольного образца. Зная соответствие каждой нанесенной на поверхность микрочипа точки определенному фрагменту определенной хромосомы, можно судить о копийности этого участка хромосомы в исследуемом образце. Таким образом, проводится анализ потери или наличия лишних хромосом (числовых хромосомных аномалий).

В данной работе поставлена задача изготовления макета ДНК-микрочипа и определения его пространственных параметров.

Для печати прототипа ДНК-микрочипа использовано печатающее устройство Sonoplot GIX Microplotter II (Sonoplot). В качестве подложки использовано предметное стекло размером 25×75×1 мм с биополимерным покрытием, обеспечивающим прочное связывание ДНК-зондов с поверхностью [2]. ДНК человека помещена в буферный раствор в концентрации 100 нг/мкл (ДНК-зонд).

Макет ДНК-микрочипа включает в себя матрицу 6×7, состоящую из 42 дискретно нанесенных точек. Диаметр точек 50–60 мкм, расстояние между точками – 200 мкм.

Для оценки пространственных параметров матрицы использован профилометр Profilm3D.

Результаты и их обсуждение. С использованием профилометра Profilm3D проведена оценка пространственных параметров полученных участков ДНК (точек). Общая картина расположения точек приведена на рис. 1.

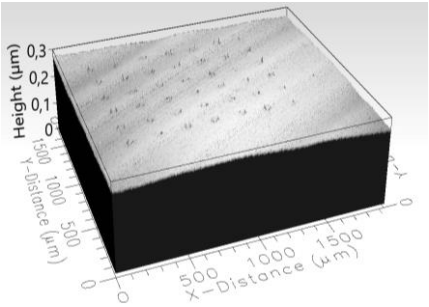


Рис. 1. Макет ДНК-микрочипа

На рис. 2 приведена профилограмма четырех близкорасположенных точек в левом нижнем углу макета микрочипа.

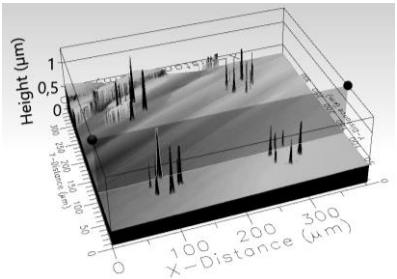


Рис. 2. Профилограмма участка ДНК-микрочипа

Установлено, что распределение фрагментов ДНК внутри точек неравномерно. При высыхании точек наблюдается «эффект кофейного пятна» [3], состоящего из 4–7 частей ДНК-материала по периферии капли.

Изготовленный макет исследован лазерным сканером для чтения флуоресцентных сигналов с микрочипов SureScan (Agilent Technologies) (рис. 3).

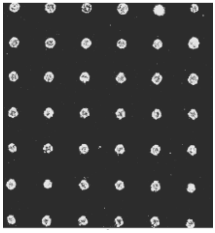


Рис. 3. Изображение с лазерного сканера для чтения флуоресцентных сигналов

Фрагментарность точек оказывает негативное влияние на последующий анализ интенсивности флуоресценции, поэтому желательно иметь точки с равномерным заполнением молекулами ДНК.

Предварительные эксперименты показали, что увеличение концентрации ДНК в наносимом на подложку ДНК-зонде приводит к засвечиванию получаемого с помощью лазерного сканера изображения. Таким образом, получение равномерного распределения ДНК внутри точки за счет увеличения концентрации ДНК невозможно. В качестве альтернативы может быть использован другой растворитель для ДНК-зонда, который за счет повышения вязкости не приведёт к смещению молекул ДНК к периферии точки.

Заключение. Использование профилометра при оценке качества печати ДНК-микрочипа позволило установить, что:

1) при использовании буферного раствора ярко проявляется «эффект кофейного пятна» – смещение молекул ДНК к периферии точки;

2) наблюдается устойчивое разделение точки на 4–7 областей по периферии;

3) дальнейшее исследование должно быть направлено на получение более равномерного распределения ДНК внутри точки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чиряева О.Г., Петрова Л.И., Садик Н.А. и др. Цитогенетический анализ хориона при неразвивающейся беременности // Журнал акушерства и женских болезней. – 2007. – Т. 56, № 1.

2. Eisen M.B., Brown P.O. DNA arrays for analysis of gene expression // Methods in enzymology. Academic Press. – 1999. – Vol. 303. – P. 179–205.

3. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: ТУСУР, 2015. – 69 с.

УДК 628.931

КОНСТРУИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСПЛЕЯ

А.А. Максименко, Е.Л. Егорова, О.Д. Хвалёва, студенты

Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент

г. Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, soldatkinvs@main.tusur.ru

Проект ГПО - РЭТЭМ-2003 «Светодиодные светильники специального назначения»

Излагаются результаты конструирования светодиодного вращающегося дисплея. Разработана схема электрическая принципиальная для изготовления макета светодиодного вращающегося дисплея**,** спроектировано крепление вращательного механизма, по результатам аналитического обзора выбрана светодиодная адресная лента WS2812B.

Ключевые слова: светодиодный проектор, индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа, 3D-изображение.

Известно [1], что огромным рынком применения светодиодов является отображение информации для рекламных целей. В таких устройствах применяются индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа основных цветов свечения. У индикаторных светодиодов достаточно яркости, чтобы отображать информацию и не создавать ослепляющий эффект от дисплеев. За счёт комбинации цветов красного, зелёного и синего (RGB) можно получать любые цвета и оттенки [2]. В настоящее время существует множество видов отображения рекламной информации. Для этого применяются различные

устройства, например, самые известные из них: слайд-проекторы, эпископы, оверхед-проекторы, мультимедиапроекторы и т.д. С каждым годом из более простых компонентов изобретаются новые виды отображения информации, одним из них является вращающийся светодиодный дисплей. Суть работы такого устройства заключается в том, что к адресной светодиодной ленте прикрепляется вращающий ее механизм, он регулирует скорость вращения светодиодной ленты, а микроконтроллер управляет яркостью каждого светодиода [3].

Целью работы является создание вращающегося дисплея, обеспечивающего вращение изображения, что позволит увеличить разрешающую способность дисплея, то есть улучшить качество воспроизводимого изображения с применением системы балансирования яркости светодиодов и стабилизации системы вращения конструкции без увеличения скорости вращения дисплея и количества используемых светодиодов без увеличения затрат на электроэнергию и стоимость производства.

На основе литературного обзора выбрана светодиодная адресная лента для светодиодного вращающегося дисплея. На рис. 1 приведена схема электрическая принципиальная светодиодного вращающегося дисплея. На рис. 2 изображён макет вращательного механизма. В таблице приведены основные электрические и световые характеристики адресной ленты.

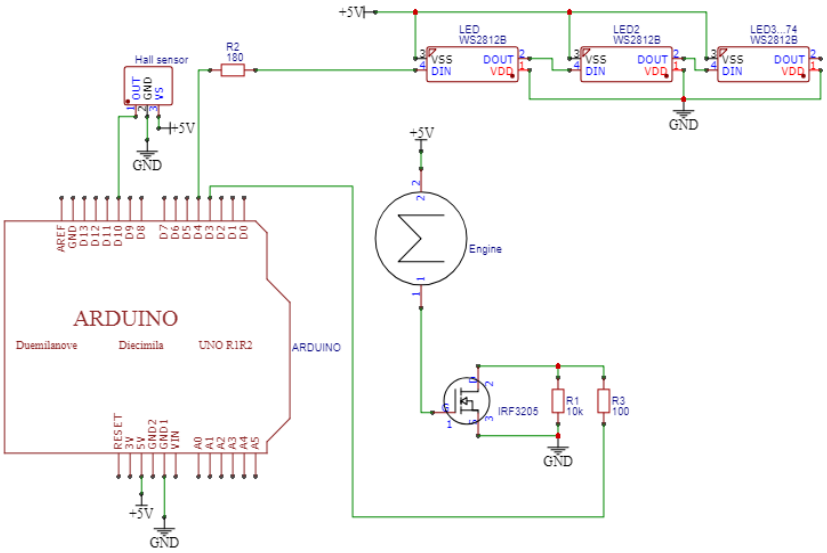


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема светодиодного вращающегося дисплея

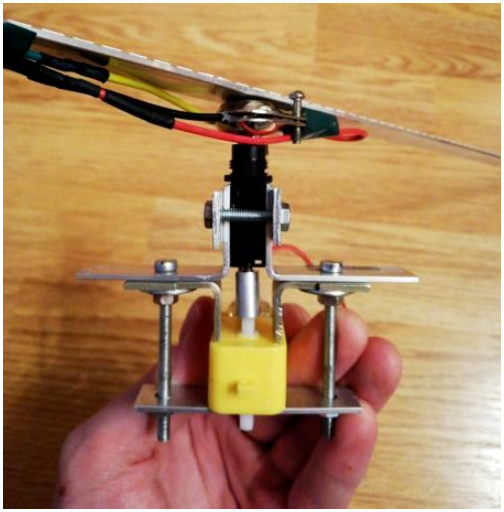


Рис. 2. Макет вращательного механизма

Характеристики адресной светодиодной ленты WS2812B

Напряжение питания	5 В
Плотность светодиодов	144 светодиода на метр ленты
Диапазон рабочих температур	от –25 до +80 °С
Класс защиты	IP30

Выводы. Разработана схема электрическая принципиальная для изготовления макета светодиодного вращающегося дисплея, по результатам аналитического обзора выбрана адресная светодиодная лента, сконструирован макет вращательного механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вилисов А.А., Дохтуров В.В., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 5, № 13. – С. 50–51.

2. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

3. Максименко А.А., Егорова Е.Л., Хвалёва О.Д. Проектирование светодиодной лампы для мультимедийного проектора // Сб. статей матер. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладные исследования в области физики». – Иркутск, 4 декабря 2019 г. / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т. – С. 156–161.

УДК 628.9.038

ВЛИЯНИЕ КРАСНОГО ЛЮМИНОФОРА В СОСТАВЕ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ИНДЕКС ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ СВЕТОДИОДА БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ

Е.С. Ганская, магистрант каф. ИТ;
Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов, студенты каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ
г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru

Объектом исследования данной работы является люминофорная композиция. В данной работе были проведены исследования о влиянии красного люминофорного порошка в составе люминофорной композиции на индекс цветопередачи светодиода белого цвета свечения. На основе полученных результатов сделаны заключения.
Ключевые слова: люминофорная композиция, индекс цветопередачи, люминофорный порошок.

Индекс цветопередачи – один из важнейших показателей при создании любого типа освещения. Ещё несколько десятилетий назад вопрос о повышении индекса цветопередачи практически не поднимался, так как основным источником света являлись лампы накаливания, а их цветопередача равна 90–98% [1]. Однако с выводом на рынок светодиодных источников света значение показателя индекса цветопередачи приобрело актуальность. Светодиодные источники света имеют наименьшие показатели цветопередачи. Одним из способов повышения индекса цветопередачи светодиодных источников света является подбор состава люминофорной композиции.

Цель работы: исследование влияния концентрации красного люминофора в составе люминофорной композиции на индекс цветопередачи светодиода белого цвета свечения (рис. 1).

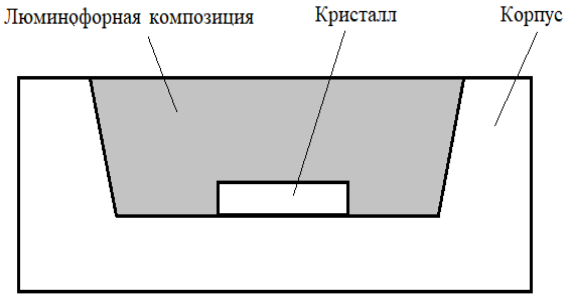


Рис. 1. Схематическое изображение светодиода белого цвета свечения

Люминофорная композиция (ЛК) – это полимерная композиция светотехнического назначения, содержащая эпоксидное связующее, в котором распределены люминесцентные пигменты с размером частиц менее 15–5 мкм [2]. Для исследований используем люминофорный порошок желто-зеленого и красного цветов, а также эпоксидный компаунд в качестве связующего компонента.

Технические характеристики люминофорных порошков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики люминофорных порошков

Наименование порошка	Цвет люминофорного порошка	Размер частиц, мкм	Максимум спектра излучения, нм
L-550	Жёлто-зеленый	30–32	552
L-540	Зелёный	15–20	542
L-625	Красный	15–25	628

В качестве связующего в люминофорной композиции используется оптически прозрачный компаунд ELASTOSIL ® Wacker Chemie AG, серия RT 604, основные технические характеристики приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2

Технические характеристики компаунда

Наименование параметра	Значение параметра
Плотность, г/см^3	0,97
Твёрдость по Шору, А	25
Объёмное сопротивление, Ом·см	10^{15}
Диэлектрическая проницаемость	2,6

Состав люминофорных композиций для проведения исследований представлен в табл. 3.

Таблица 3

Процентное соотношение смеси люминофорных порошков от общей массы компаунда

Наименование	Соотношение люминофорных порошков
Образец 1	L-550 (7%) + L-625 (3%)
Образец 2	L-550 (7%) + L-625 (1%)
Образец 3	L-550 (7%) + L-540 (3%)

Используя составление соотношения люминофорных порошков в составе люминофорной композиции, были изготовлены макеты светодиодов для проведения исследований.

С помощью спектроколориметра зафиксированы необходимые данные для внесения в программу расчета индекса цветопередачи.

В результате измерений макетов были получены данные, отраженные в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений макетов

Наименование	Индекс цветопередачи
Образец 1	80
Образец 2	72
Образец 3	72

Из полученных данных видно, что люминофорная композиция с составом, определенным в образце 2 и 3, имеет индекс цветопередачи 72, а самый высокий индекс цветопередачи достигается в светодиоде с использованием люминофорной композиции с составом, определенным в образце 1, – индекс цветопередачи равен 80.

В результате исследований выявлено, что, использование люминофорного порошка красного цвета в составе люминофорной композиции светодиода белого цвета свечения повышает индекс цветопередачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индекс цветопередачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elec.ru/articles/svetodiody-s-vysokim-cri-ra/ (дата обращения: 10.02.2020).

2. Люминофорная композиция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://findpatent.ru/patent/240/2405804.html (дата обращения: 22.02.2020).

3. Компаунд ELASTOSIL RT 604 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://electronic.bmptech.ru/products/zalivochnye-silikonovye-kompaundy/elastosil-rt-604 (дата обращения: 24.02.2020).

УДК 628.931

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОДНОРОДНОСТЬ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ

Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов, А.В. Кулешов, Д.В. Черных, студенты; Ю.В. Юлаева, аспирант

Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ

г. Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, soldatkinvs@main.tusur.ru

Проект ГПО – РЭТЭМ-1501 «Исследование и разработка полупроводниковых источников света»

По результатам исследований установлено, что свет измеряемой светодиодной лампы является теплым, так как ее цветовая температура находится в диапазоне от 2700 до 3200 К. Также обнаружилось, что между точкой максимальной и минимальной цветовой температуры расхождение составляет 348 К. Объясняется это конструкционным расположением светодиодных линеек в лампе.

Ключевые слова: светодиодная лампа, пространственная однородность цветовых координат, коррелированная цветовая температура.

Современная светодиодная лампа представляет собой стеклянную колбу, внутри которой расположена опорная конструкция со светодиодным излучающим элементом (СИЭ), и цоколь, в котором расположено устройство управления [1]. Колба лампы заполняется инертным газом – например, гелием, это необходимо для конвекционного отвода тепла от СИЭ. Электрические режимы работы СИЭ в лампе подбирают таким образом, чтобы их перегрев был минимальным, значение прямого тока не более 15 мА. Температура в колбе лампы может достигать 150ºС, при этом экспериментально подтверждено, что предельная максимальная температура работы СИЭ 205ºС [2]. СИЭ представляют собой несущую конструкцию, на которую в ряд смонтированы светодиодные кристалла (до 28 штук). На кристаллы нанесена люминофорная композиция. Сама по себе такая технология изготовления СИЭ вносит пространственную неоднородность цвета светодиодной лампы за счёт разных толщин в оптической системе прохождения света от кристаллов через люминофорную композицию в зависимости от направления [3]. Для оценки данного эффекта проведены исследования пространственной однородности цветовых координат светодиодной лампы.

Целью данной работы является исследование пространственной однородности цветовых координат светодиодной лампы.

Методика проведения исследований заключается в проведении измерений светодиодных ламп 4, 6, 8, 10 Вт и варианте исполнения светодиодной лампы с линзой в вершине колбы с помощью спектроколориметра ТКА-ВД и гонеофотометра. Для этого проведены измерения цветовых координат и коррелированной цветовой температуры в зависимости от угла поворота светодиодной лампы с шагом 5° в меридиональной плоскости. Результаты измерений приведены на рис. 1.

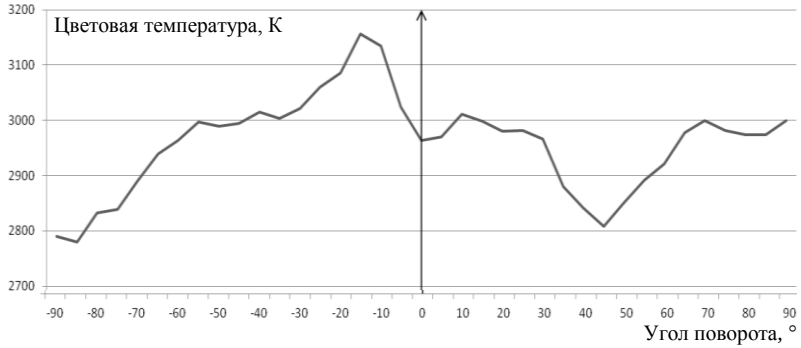


Рис. 1. Зависимость цветовой температуры от угла поворота в меридиональной плоскости

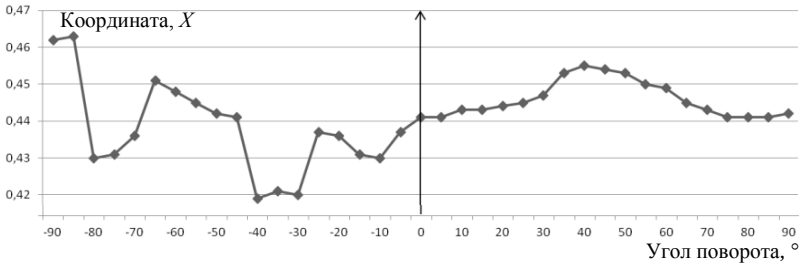


Рис. 2. Зависимость цветовой координаты *X* от угла поворота

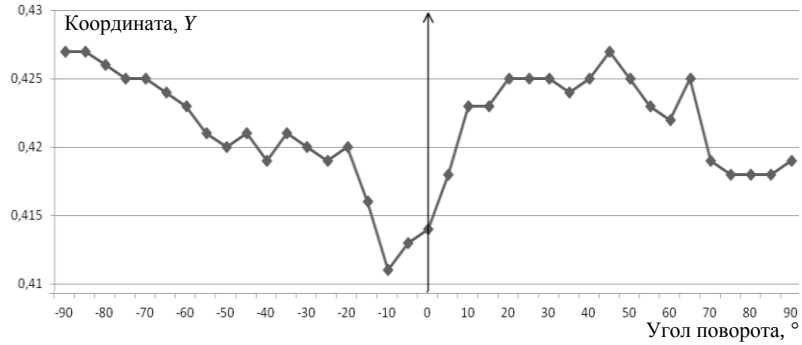


Рис. 3. Зависимость цветовой координаты *Y* от угла поворота

По результатам исследований установлено, что свет измеряемой светодиодной лампы является теплым, так как ее цветовая температура находится в диапазоне от 2700 до 3200 К. Также обнаружилось, что между точкой максимальной и минимальной цветовой температуры расхождение составляет 348 К. Объясняется это конструкционным расположением светодиодных линеек в лампе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель № 188947 Российская Федерация, МПК F21V 29/10 (2015.01), F21V 15/04 (2006.01), F21K 9/66 (2016.01). Светодиодная лампа / К.Н. Афонин, А.А. Вилисов, В.С. Солдаткин, В.И. Туев, Ю.В. Юлаева. – Приоритет от 23.05.2018. – Заявка № 2018119785 от 23.05.2018. – Опубл. 30.04.2019. – Бюл. № 13.

2. Стасенко Ю.И., Максименко А.А., Солдаткин В.С. Определение предельных термоэлектрических режимов работы светодиодного излучающего элемента // Сб. статей матер. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладные исследования в области физики». Иркутск, 4 декабря 2019 г. – Иркутск: Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2019. – С. 189–193.

3. Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Afonin K.N., Vilisov A.A. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb // IOP Conf. Series: JournalofPhysics: Conf. Series. – 2018. – Т. 1115. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/5/052012

УДК 628.931

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОДНОРОДНОСТИ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов, А.В. Кулешов, И.В. Попов, студенты; Ю.В. Юлаева, аспирант

Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ

г. Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, soldatkinvs@main.tusur.ru

Проект ГПО – РЭТЭМ-1501 «Исследование и разработка полупроводниковых источников света»

Излагаются результаты исследований пространственной однородности цветовых координат светодиодного излучающего элемента. Исследованы два варианта приготовления люминофорной композиции с использованием рассеивателя по типовой производственной технологии. Установлено, что добавление рассеивателя не приводит к снижению световой отдачи, разница с результатами обычного нанесения люминофорной композиции на СИЭ в условиях серийного производства не превышает погрешности измерений. Добавление рассеивателя приводит к повышению пространственной однородности цветовых координат на 10%, коррелированной цветовой температуры – на 15%.

Ключевые слова: светодиодный излучающий элемент, пространственная однородность цветовых координат, коррелированная цветовая температура.

Пространственная однородность цвета является важной характеристикой источников света. Особо актуален этот вопрос для светодиодных источников света. Пространственная однородность цвета светодиодного источника обусловлена методом нанесения люминофорной композиции на светодиодные кристаллы. Неоднородность цвета может возникать при неправильно подобранной толщине люминофорной композиции, низкой концентрации люминофоров в композиции и неравномерном распределении частиц люминофора в композиции. Неравномерное распределение частиц люминофора в композиции может быть обусловлено технологическими факторами.

Во-первых, недостаточное размешивание композиции может привести к дегазированию перед нанесением на светодиодные кристаллы. Во-вторых, после перемешивания и дегазации до нанесения композиция достаточно долго пролежала, что в соответствии с гравитационными силами привело к осаждению тяжёлых крупных частиц в нижнюю часть ёмкости и поднятие лёгких частиц на поверхность композиции [1, 2]. Известен способ изготовления светодиодного из-

лучающего элемента (СИЭ) (LED filament bulb) для ламп общего назначения [3], который можно распространить на все светодиодные модули, в которых более одного светодиодного кристалла, и люминофорная композиция наносится на группу кристаллов сплошной заливкой. Суть данного метода заключается в добавлении в люминофорную композицию мелкодисперсных прозрачных частиц рассеивателя, что позволяет существенно увеличить пространственную однородность цветового распределения (СИЭ).

Целью данной работы является исследование пространственной однородности цветовых координат светодиодного излучающего элемента в условиях серийного производства.

Методика проведения исследований заключается в изготовлении заготовки рамки с несущими конструкциями СИЭ, приготовлении люминофорной композиции с рассеивателем и автоматизированном нанесении люминофорной композиции на СИЭ. Далее с помощью спектроколориметра ТКА-ВД и гонеофотометра проводят измерения цветовых координат и коррелированной цветовой температуры в зависимости от угла поворота СИЭ с шагом 5° в азимутальной плоскости.

На рис. 1 приведён график зависимости цветовых координат от угла поворота СИЭ, для макета СИЭ с рассеивателем и для СИЭ, изготовленного по технологической документации.

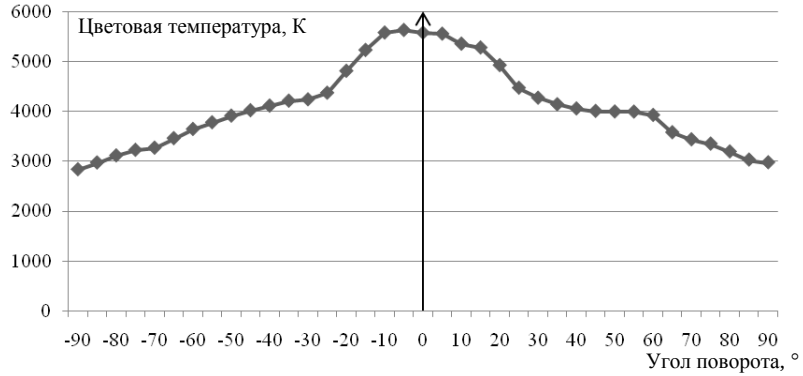


Рис. 1. График зависимости цветовой температуры от угла поворота в азимутальной плоскости

По результатам исследований было установлено, что добавление рассеивателя не приводит к снижению световой отдачи. Разница с результатами обычного нанесения люминофорной композиции на СИЭ в условиях серийного производства не превышает погрешности измерений. Добавление рассеивателя приводит к повышению про-

странственной однородности цветовых координат на 10%, коррелированной цветовой температуры – на 15%.

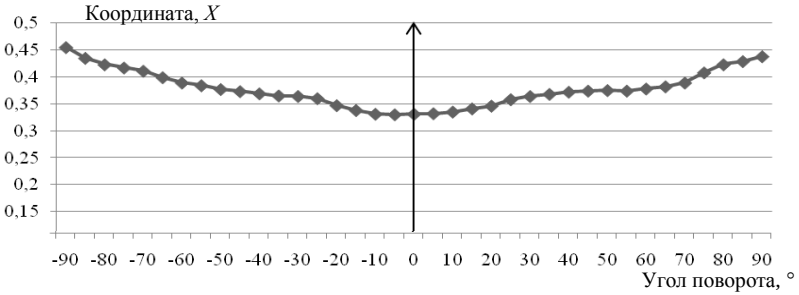


Рис. 2. График зависимости координаты *X*
от угла поворот в азимутальной плоскости

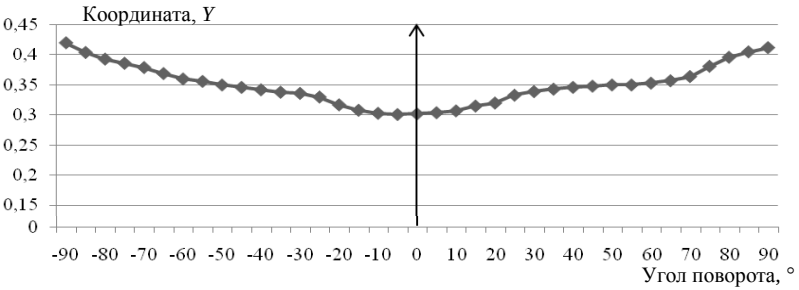


Рис. 3. График зависимости координаты *Y*
от угла поворота в азимутальной плоскости

ЛИТЕРАТУРА

1. Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Afonin K.N., Vilisov A.A. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb // IOP Conf. Series: JournalofPhysics: Conf. Series. – 2018. – T. 1115. – P. 052012. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/5/052012

2. Андреева М.В., Ганская Е.С., Гайбович Е.С., Черепнев А.И. Пространственное распределение коррелированной цветовой температуры светодиодной лампы общего применения // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. (28–30 ноября 2018 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 249–252.

3. Патент на полезную модель № 193054 Российская Федерация, МПК F21S 4/20 (2016.01), F21V 9/00 (2015.01). Светодиодная лента для лампы / М.В. Андреева, К.Н. Афонин, А.А. Вилисов, Е.С. Ганская, В.С. Солдаткин, В.И. Туев, К.В. Тепляков. – Приоритет от 19.06.2019 г. – Заявка № 2019119283 от 19.06.2019 г. – Опубл. 11.10.2019 г. – Бюл. № 29.

УДК 628.166.085

РАСЧЁТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ НА ОСНОВЕ УФ-ДИОДОВ

Т.С. Михальченко, А.О. Шардина,
Л.Ш. Юлдашова, студенты каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ
г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru
Проект ГПО – РЭТЭМ-2001 «Антибактериальный полупроводниковый источник излучения»

Излагаются результаты исследований воздействия на микроорганизмы в водной среде ультрафиолетовым излучением от полупроводниковых диодов с длинами волн 365 и 275 нм. В ходе исследований установлено, что наибольшим бактерицидным действием обладают УФ-диоды с длиной волны 275 нм.
Ключевые слова: УФ-диод, дезинфекция воды, микроорганизмы.

Вода играет фундаментальную роль в жизни людей. Основными процессами подготовки питьевой воды являются осветление и обеззараживание. Для обеззараживания воды в настоящее время широко применяется безреагентный метод обеззараживания ультрафиолетовым (УФ) излучением. Преимущество данного метода по сравнению с реагентным очевидно, как для жизни и здоровья людей, так и для экологического влияния на окружающую среду. Также существуют способы улучшения качества воды: умягчение, обессоливание, обезжелезивание, дегазация, обезвреживание и дезактивация. Например, в небольших населённых пунктах, где отсутствует промышленное производство, основными загрязнителями воды являются: неприятный запах, повышенное содержание железа, мутность, цветность, жёсткость, микробы, примеси, марганец.

Целью работы является расчёт устройства для обеззараживания воды на основе УФ-диодов.

В работах [1–3] приведены результаты воздействия УФ-излучения от кварцевой лампы и УФ-диода с длиной волны излучения 385 нм на микроорганизмы в водной среде в зависимости от времени облучения. Аналогично проведены исследования с применением УФ-диодов с длинами волн 365 и 275 нм.

Исходя из вышесказанного, устройство для обеззараживания воды на основе УФ-диодов должно обеспечивать дозу облучения не менее 25 мДж/см^2. Следует взять двукратный запас по дозе облучения, чтобы предусмотреть деградацию УФ-диодов от времени наработки.

В табл. 1 приведена зависимость значения потока излучения от длины волны.

Таблица 1

Зависимость значения потока излучения УФ-диода от длины волны

Длина волны, нм	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310
Поток излучения, Вт	0,09	0,093	0,1	0,12	0,17	0,28	0,61	3,06	15,29	91,74

Из табл. 1 видно, что рост длины волны излучения приводит к росту необходимого для облучения светового потока, особенно эта зависимость усиливается на длинах волн свыше 290 нм.

Таблица 2

Характеристика УФ-диодов

Наименование параметра	УФ-диод		
Значение прямого тока, мА	100	150	60
Значение прямого напряжения, В	6	6–10	5–8
Значение мощности излучения, мВт	3	10	1–2
Значение длины волны излучения, нм	275	285	295
Значение потребляемой мощности, мВт	0,7	0,7	0,7–1,2
Количество диодов для дезинфекции 1 см^3 воды	5	7	7

По данным из табл. 1 и 2 и экономическим расчетам установлено, что наибольшим бактерицидным действием обладают УФ-диоды с длиной волны 275 нм. На рис. 1 приведены результаты исследований воздействия УФ-излучением диода с длиной волны 275 нм на микроорганизмы в водной среде на 1 см^3.

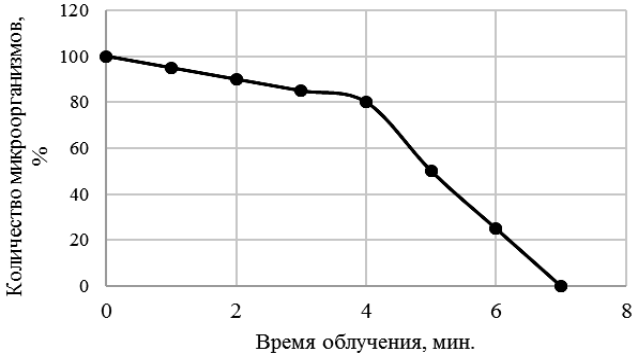


Рис. 1. Зависимость количества микроорганизмов в воде от времени облучения

В ходе исследований установлено, что для обеззараживания 1 см^3 воды одним УФ-диодом с длиной волны излучения 275 нм и оптической мощностью 3 мВт требуется 7 мин. Далее планируется изготовить установку для дезинфекции воды с 5 шт. УФ-диодов и провести аналогичные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михальченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш., Солдаткин В.С. Влияние ультрафиолетового излучения на микроорганизмы в водной среде // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XV Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 ноября 2019 г.: в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 24–26.

2. Михальченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш. Обеззараживание воды с помощью ультрафиолетового излучения // Сб. статей матер. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладные исследования в области физики». Иркутск, 4 декабря 2019 г. – Иркутск: Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2019. – С. 113–117.

3. Михальченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш. Расчёты устройства для обеззараживания воды на основе УФ-диодов // Сб. статей матер. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладные исследования в области физики». Иркутск, 4 декабря 2019 г. – Иркутск: Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2019. – С. 137–141.

УДК 628.9.03

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ДЛЯ САДОВОДСТВА

Д.Б. Тудупова, Р.М. Оразалы, студенты каф. РЭТЭМ ТУСУР;
А.И. Черепнев, студент НИ ТПУ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ
г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru
Проект ГПО – РЭТЭМ-2003 «Светодиодные светильники специального назначения»

Излагаются результаты анализа исследования требований к энергетическим характеристикам светодиодных светильников для садоводства.
Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, фотосинтез, светодиод.

Одиим из немаловажных факторов влияния на рост рассады и увеличения сбора спелого урожая является качество светового потока и его продолжительность, светового дня и интенсивность света. Отрегулировать эти показатели помогает дополнительное искусственное освещение. Также нужно учитывать то, что больше нужно стараться использовать естественный свет, это позволяет сохранить вкус урожая и расходы содержания теплиц. Например, в летний период естественного света будет достаточно, актуально использовать светильники в осенне-весенний и зимний периоды, когда продолжительность и освещенность дня сокращаются [1].

Преимуществами дополнительного светодиодного освещения со специально подобранным спектром являются увеличение урожайности и возможность получения созревших плодов даже в условиях недостаточного естественного света [2].

Цель работы – расчет количества светодиодов светильника для питания зелени в осенний период на один квадратный метр.

С помощью спектроколориметра ТКА-ВД измерены спектральные характеристики светодиодов и построен график.

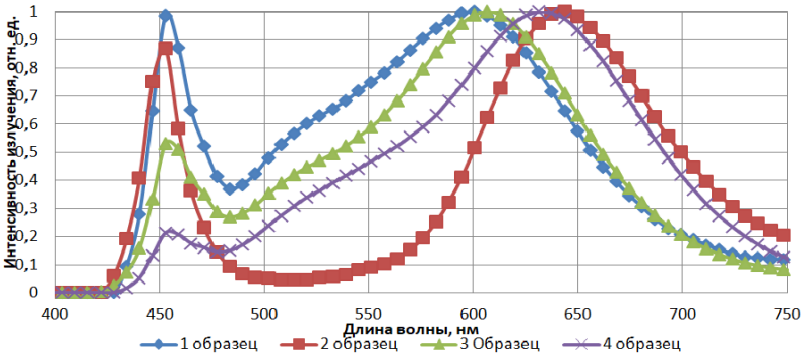


Рис. 1. Спектральные характеристики образцов светодиодов для теплиц

С помощью расчетов определим количество требуемых светодиодов на один квадратный метр по формуле

$$N = E \cdot k \cdot S \cdot Z / \Phi \cdot h,$$

где E – облученность, Вт/м^2; k – коэффициент запаса, k = 1,3 для люминесцентных ламп; S – освещаемая площадь, габариты теплицы (6×3) м; Z – коэффициент минимальной освещенности; Z = 1,1 – для люминесцентных ламп; h – коэффициент использования светового потока в долях единицы, найденный по таблице относительной чувствительности человеческого глаза.

$$N = \frac{1,4 \cdot 1,31 \cdot 81,1}{10,15 \cdot 0,4} = \frac{30,036}{4,06} = 8,87.$$

Следовательно, на один квадратный метр нам потребуется 8–9 светодиодов.

В результате работы были подобраны светодиоды с нужным спектром, исследованы энергетические характеристики и рассчитано количество светодиодов для освещения одного квадратного метра теплицы. Установлено, что наиболее подходящим светодиодом для досветки зелени является образец со спектром излучения с максимумами в синей области оптического спектра (460 нм) и в красной области оптического спектра излучения (643,7 нм), и значение PPFD, рав-

ное 216 мкмоль/с·м^2 при минимальном необходимом значении для зелени от 150 мкмоль/с·м^2. Значение облученности E = 4,51 Вт/м^2 и количество светодиодов для освещения одного квадратного метра теплицы составило 19 шт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neznamova E.G., Soldatkin V.S., Timoshenko P.V., Tuev V.I., Khomaykov A.J. The use of energy-efficient sources while growing a small quantity of the cucumber under the artificial lighting agricultural ecosystem // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 224. – P. 012048. DOI:10.1088/1755-1315/224/1/012048

2. Досветка в теплицах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rusteplica.ru/dosvetka-v-teplicah/ (дата обращения: 01.03.2020).

3. Krot.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://krrot.net/domashnee-vurashivanie-zeleni/ (дата обращения: 06.03.2020).

4. Гидропоника в домашних условиях: зелень, томаты, огурцы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dzagigrow.ru/blog/gidroponika-v-domashnikh-usloviyakh-zelen-tomaty-ogurtsy/ (дата обращения: 06.03.2020).

5. Исследования светотехнических характеристик светодиодов для светильников для теплиц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=38507831 (дата обращения: 06.03.2020).

УДК 628.931

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛЬНЫЕ СРЕДЫ

А.Г. Саинский, А.А. Мазеина, М.Х. Фам, студенты каф. РЭТЭМ

Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ

г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru

Проект ГПО – РЭТЭМ-1501 «Исследование и разработка полупроводниковых источников света»

Разработаны люминофорные композиции, в состав которых добавлен люминофор красного цвета с максимумом длины волны излучения 625 нм, измерены спектры излучения для разработанных люминофорных композиций в зависимости от концентрации в них красного люминофора, установлено, что во всех вариантах цветовые координаты лежат в непосредственной близости к кривой Планка на диаграмме МКО и находятся в пределах эллипса Мак Адама. Следовательно, на основе разработанных люминофорных композиций можно изготовить источник излучения белого цвета с коррелированной цветовой температурой 3500 К для светодиодного поискового судового прожектора.

Ключевые слова: светодиодный поисковый судовой прожектор, люминофорные композиции, коррелированная цветовая температура.

В настоящее время не решена проблема, связанная с безопасностью движения речного транспорта в условиях тумана, снегопада, дождя, дымки – естественных и искусственных атмосферных аэрозолей, которые существенно снижают видимость особенно в тёмное время суток. Если в автомобильной промышленности в каждом автомобиле уже предусмотрена установка противотуманных фар, то на речном флоте используются судовые поисковые прожекторы по спектральным составляющим излучения, аналогичные источникам дальнего света автомобильных фар, на основе галогеновых ламп. В настоящее время достижения полупроводниковой светотехники позволяют создавать высокоэффективные [1] (световая отдача долее 150 лм/Вт) и надёжные [2] (срок службы более 80 000 ч) источники света. Аэрозоли – дисперсные системы с газовой дисперсионной средой и твердой или жидкой дисперсной фазой. Аэрозоли делятся на конденсационные (образуются в результате присоединения молекул вещества в паре или конденсации пара на присутствующих в нём ионах или частицах вещества, с жидкой дисперсной фазой – туман, с твёрдой – дым) и диспергационные (образуются в результате измельчения твёрдых тел – пыль или в результате распада струй или плёнок жидкостей – спреи).

Атмосферные аэрозоли принято классифицировать следующим образом: облака, туманы, дымка, морось и осадки, осадки делятся на дождь и снег. Направленный поток электромагнитного излучения, проходящий через атмосферные аэрозоли, ослабляется вследствие рассеивания (изменение направления потока фотонов) и поглощения компонентами аэрозоля (преобразуют электромагнитное излучение в другой вид энергии, например, в тепло). Коротковолновая часть оптического спектра излучения в большей степени подвержена поглощению и рассеиванию в аэрозольной среде, именно по этой причине за счёт светодиодных источников света подбором состава люминофорной композиции можно создать спектр излучения прожектора, световой поток которого будет минимально подвержен ослаблению при прохождении через атмосферные аэрозоли [3].

Целью работы является создание люминофорной композиции для противотуманного поискового судового прожектора.

Проведен технико-экономический анализ, на основе которого разработаны требования поискового судому прожектору приведены в таблице.

Изготовлены люминофорные композиции, спектр излучения которых приведён на рис. 1–3. Измерения проведены с помощью спектроколориметра ТКА-ВД. На рис. 4 приведена диаграмма МКО со значениями люминофорных композиций.

Технические требования к комбинированному светодиодному светильнику для общего и архитектурного освещения

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Световой поток	лм	Не менее 2700
Угол излучения по уровню 0,5 от максимального значения силы света	град	30
Коррелированная цветовая температура	К	3500

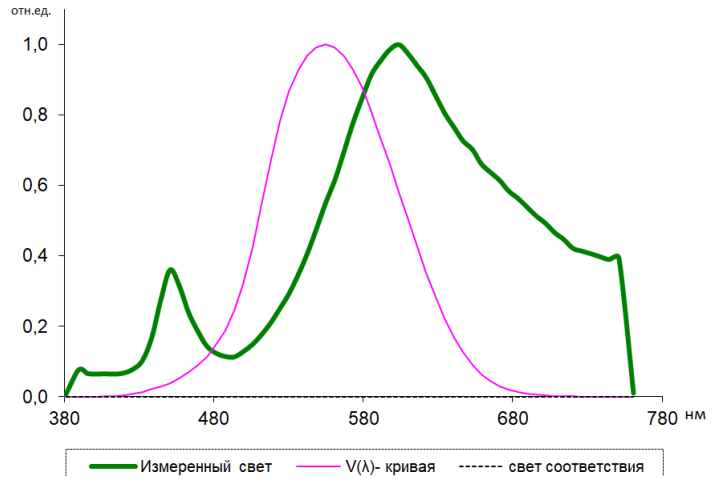


Рис. 1. Спектр излучения люминофорных композиций с 3% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции

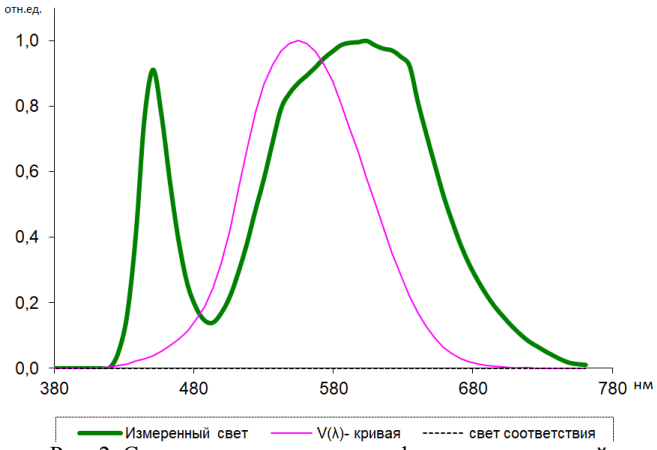


Рис. 2. Спектр излучения люминофорных композиций с 5% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции

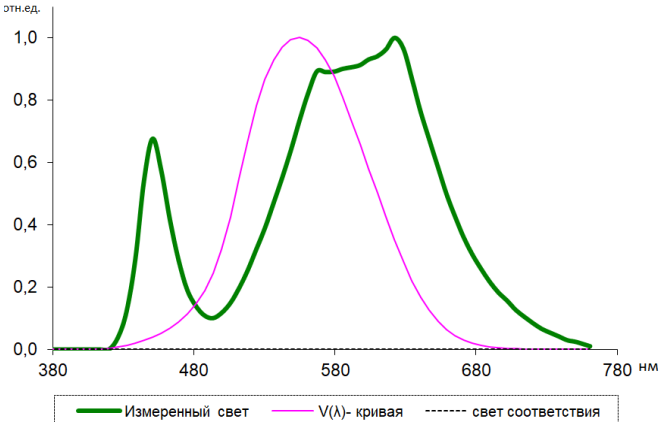


Рис. 3. Спектр излучения люминофорных композиций
с 7% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции

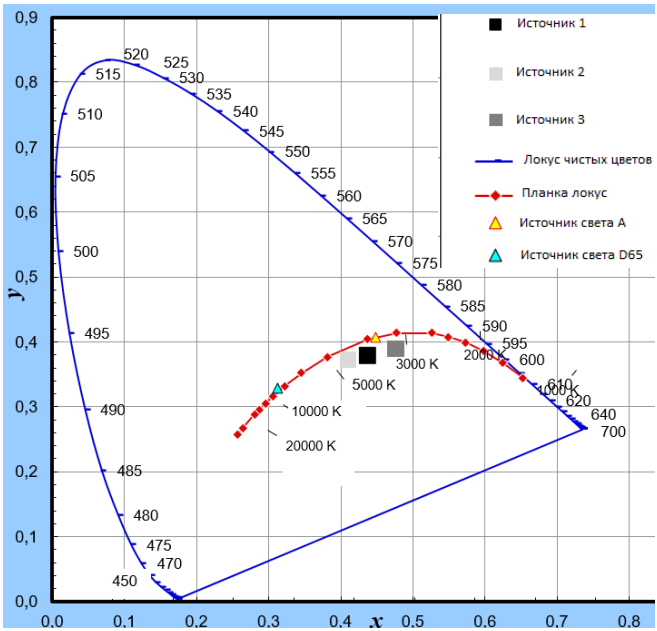


Рис. 4. Диаграмма МКО люминофорных композиций для поискового судового прожектора. Источник *1* – с 7% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции (Тц1 = 2784); источник *2* – с 5% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции (Тц2 = 3262); источник *3* – с 3% красного люминофора от общей массы люминофорной композиции (Тц3 = 2356)

Выводы. Разработаны люминофорные композиции, в состав которых добавлен люминофор красного цвета с максимумом длины волны излучения 625 нм, измерены спектры излучения для разработанных люминофорных композиций в зависимости от концентрации в них красного люминофора, установлено, что во всех вариантах цветовые координаты лежат в непосредственной близости к кривой Планка на диаграмме МКО и находятся в пределах эллипса Мак Адама. Следовательно, на основе разработанных люминофорных композиций можно изготовить источник излучения белого цвета с коррелированной цветовой температурой 3500 К для светодиодного поискового судового прожектора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Afonin K.N., Vilisov A.A. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1115. – P. 052012. DOI:10.1088/1742-6596/1115/5/052012

2. Гончарова Ю.С., Гарипов И.Ф., Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 2. – С. 51–53.

3. Акименко Т.А., Горбунова О.Ю. Прохождение света сквозь аэрозольную среду // Изв. ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 5, ч. 3.

УДК 628.931

КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА ДЛЯ ОБЩЕГО И АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Е.В. Шнайдер, Д.Л. Николаев,
Ю.И. Стасенко, студенты каф. РЭТЭМ
Научный руководитель В.С. Солдаткин, к.т.н., доцент каф. РЭТЭМ
г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru
Проект ГПО – РЭТЭМ-2003 «Светодиодные светильники специального назначения»

Разработан эскизный проект комбинированного светодиодного светильника для общего и архитектурного освещения, в соответствии с которым изготовлен макет светильника. Проведены исследования спектра излучения макета светильника и измерены значения кривой силы света. Установлено, что спектр излучения макета светильника по максимумам в красной, зелёной и синей области оптического спектра соответствует требуемым значениям (625, 525, 450) нм с погрешностью измерений ±5 нм. Из измеренной кривой силы света

видно, что угол излучения макета светильника по уровню 0,5 от максимума составляет 120°.
Ключевые слова: комбинированный светодиодный светильник, архитектурное освещение, общее освещение.

Архитектурное освещение предназначено для освещения фасадов зданий, монументов и исторических памятников. Светодиодное архитектурное освещение в основном предназначено для декоративных целей. Архитектурное освещение преимущественно используется в крупных населённых пунктах для подсветки фасадов исторических объектов и для рекламного освещения. В настоящее время существует ряд светодиодов основных цветов свечения, в том числе красного, зелёного и синего (RGB) с высоким КПД более 15 %. С их помощью можно получать любые цвета и оттенки [1] и изготавливать светотехнические устройства для архитектурного освещения. Существуют мощные светодиодные источники белого цвета свечения, за счёт высокоэффективной люминофорной композиции [2] световая отдача превышает 150 лм/Вт. Именно благодаря таким светодиодам можно изготовить комбинированный светодиодный светильник для общего и архитектурного освещения. Сегмент рынка – частный сектор.

Целью работы является создание многофункционального светодиодного светильника, предназначенного как для общего, так и для архитектурного освещения.

Проведен технико-экономический анализ [3], на основе которого разработаны требования к комбинированному светодиодному светильнику для общего и архитектурного освещения. Технические требования к комбинированному светодиодному светильнику для общего и архитектурного освещения приведены в таблице.

Технические требования к комбинированному светодиодному светильнику для общего и архитектурного освещения

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Потребляемая электрическая мощность	Вт	Не более 35
Спектр излучения для функции архитектурного освещения в красной области	нм	625
Спектр излучения для функции архитектурного освещения в зелёной области	нм	525
Спектр излучения для функции архитектурного освещения в синей области	нм	450
Коррелированная цветовая температура для функции общего освещения	К	3500
Световая отдача для функции общего освещения	лм/Вт	100

Изготовлен макет комбинированного светодиодного светильника для общего и архитектурного освещения. Проведены исследования его спектра излучения (рис. 1) с помощью спектроколориметра ТКА-ВД и измерена кривая силы света в азимутальной и меридиональной плоскости с помощью гониофотометра (рис. 2).

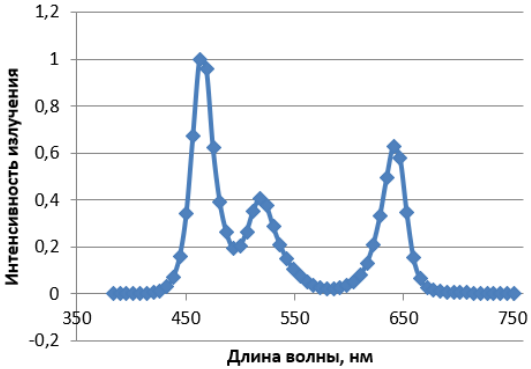


Рис. 1. Спектр излучения комбинированного светодиодного светильника для общего и архитектурного освещения

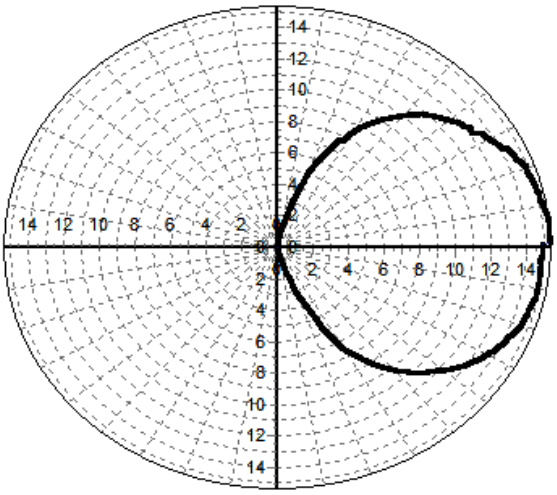


Рис. 2. Кривая силы света комбинированного светодиодного светильника для общего и архитектурного освещения в полярных координатах

Выводы. Разработан эскизный проект комбинированного светодиодного светильника для общего и архитектурного освещения, в со-

ответствии с которым изготовлен макет светильника. Проведены исследования спектра излучения макета светильника и измерены значения кривой силы света. Установлено, что спектр излучения макета светильника по максимумам в красной, зелёной и синей области оптического спектра соответствует требуемым значениям (625, 525, 450) нм с погрешностью измерений ±5 нм. Из измеренной кривой силы света видно, что угол излучения макета светильника по уровню 0,5 от максимума составляет 120°.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вилисов А.А., Дохтуров В.В., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 5, № 13. – С. 50–51.

2. Tuev V.I., Soldatkin V.S., Andreeva M.V., Ganskaya E.S., Afonin K.N., Vilisov A.A. Investigation of phosphor compositions for led filament bulb // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol. 1115. – P. 052012. DOI:10.1088/1742-6596/1115/5/052012

3. Стасенко Ю.И., Шнайдер Е.В., Николаев Д.Л. Проектирование многофункционального светодиодного прожектора для архитектурного освещения с дистанционным управлением // Сб. статей матер. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладные исследования в области физики». Иркутск, 4 декабря 2019 г. – Иркутск: Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2019. – С. 185–188.

УДК 628.948

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИКРОКЛИМАТА РАБОЧЕГО ПОМЕЩЕНИЯ

В.И. Сиденко, А.О. Мартынова, В.Ю. Золотухин, студенты

Научный руководитель Н.В. Ливенцова, доцент (ОЯТЦ, ИЯТШ), к.т.н.

г. Томск, ТПУ, liventsovanina@tpu.ru

Разработано устройство контроля оптимальных условий труда в рабочих помещениях на предприятиях. Устройство способно контролировать температуру и влажность в помещении и выводить результаты измерения на дисплей светодиодной матрицы. Проект создан на платформе «Arduino».

Ключевые слова: микроконтроллер, программирование, датчик температуры, датчик влажности, светодиодная матрица.

Актуальность проекта обусловлена необходимостью поддержания оптимальных параметров микроклимата с целью предотвращения неблагоприятного воздействия микроклимата рабочих мест, производственных помещений на самочувствие, функциональное состояние, работоспособность и здоровье человека. Существуют аналоги

данного устройства, например ИВТМ-7 [1]. Разработанное устройство отличается более крупным дисплеем, что позволяет увидеть информацию на расстоянии нескольких метров, и рекомендациями для поддержания оптимальных условий.

Целью работы является реализация проекта «Устройство контроля оптимального микроклимата рабочего помещения» (УКОМРП), итоговым продуктом которого является устройство со светодиодной матрицей, способной отображать различные параметры микроклимата и указания по их изменению.

Принцип действия УКОМРП основывается на считывании показателей температуры и влажности датчиком BME280 [2]. После подается сигнал на микроконтроллер Atmega328, выводящий на матрицу текущие измерения. Если один из показателей (или оба) превышает норму по СанПиН 2.2.4.548–96 [3], на матрицу выводится соответствующее указание (например, при превышении заданной температуры (выше 25 ^{o}C): «Включите кондиционер», при превышении относительной влажности воздуха (выше 75%): «Откройте окно»).

Проект разработан на базе Arduino Nano; написана и отлажена программа, обеспечивающая вывод данных температуры и влажности на дисплей светодиодной матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измеритель влажности и температуры ИВТМ-7. – Режим доступа: https://www.eksis.ru/materials/articles/obzor-sravnenie-termogigrometry-ivtm-7-m.php, свободный. – Загл. с экрана.

2. Датчик BME280. – Режим доступа: https://voltiq.ru/bme280-and-arduino/, свободный. – Загл. с экрана.

3. Санитарные правила и нормы СанПиН. – Режим доступа: https://base.garant.ru/4173106/, свободный. – Загл. с экрана.

УДК 004.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА И СОЦИАЛЬНОГО РОБОТА В ОБРАЗОВАНИИ

В.В. Желонкин, А.Е. Кодоров, Е.С. Полынцев, И.Д. Шабалин, студенты; Е.С. Шандаров, зав. ЛРИИ ТУСУР

г. Томск, ТУСУР, каф. ЭП, каф. ФЭ, evgenyshandarov@gmail.com

Представлены результаты деятельности лаборатории робототехники и искусственного интеллекта по разработке программно-аппаратных комплексов, использующих НКИ, и социального робота для образовательных целей.

Ключевые слова: BCI, НКИ, нейрокомпьютерный интерфейс, робототехника, RoboCup.

В последние годы стали коммерчески доступны устройства, позволяющие считывать электроэнцефалограммы, или, по-другому, состояния сознания человека. Это открывает исследователям и разработчикам новые горизонты для управления внешними устройствами и виртуальной реальностью. Именно поэтому одной из перспективных профессий будущего является нейропилотирование [1].

Нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ, BCI) – это интерфейс между человеком и компьютером, который получает команды напрямую от мозга без совершения какого-либо физического движения [2]. Нейрокомпьютерный интерфейс представляет собой программно-аппаратный комплекс для измерения электроэнцефалограммы головного мозга и программного обеспечения (ПО) для ее обработки.

Электроэнцефалограмма – электрическая активность мозга, регистрируемая с помощью электродов, расположенных на поверхности скальпа, и являющаяся результатом электрической суммации и фильтрации элементарных процессов в нейронах.

В ранних работах была показана возможность использования нейрокомпьютерного интерфейса для работы с детьми, страдающими синдромом дефицита внимания, а также эффективность использования роботов при работе с детьми и в учебном процессе [3–8]. Главное достоинство взаимодействия робот–ребенок – увлекательность процесса. Именно поэтому возможно использовать робота в образовательных целях для работы с детьми. Добавив к роботу ставший доступным нейрокомпьютерный интерфейс, возможно получить хороший инструмент для тренировки концентрации и внимания детей; получить новый метод управления робототехническими системами; способствовать получению детьми навыков, необходимых в профессии будущего.

Использование НКИ и робота в образовании. Аппаратно-программный комплекс в составе НКИ и робот могут быть использованы в образовательных учреждениях в следующих основных сценариях:

- как инструмент изучения продвинутого программирования (учащиеся старшей школы);
- как инструмент изучения особенностей работы НКИ (учащиеся средней и старшей школы);
- как тренировочный стенд по отработке навыков использования НКИ для управления роботом (учащиеся младшей и средней школы);
- как комплекс, реализующий в том числе терапевтическую функцию, например, для детей с ОВЗ (аутизм, синдром дефицита внимания).

В образовательных учреждениях РФ используется продукт отечественной компании «Нейроботикс» – Нейробелт 8, который представ-

ляет собой тканевую шапочку с закрепленными на ней электродами, подключенными к контроллеру. Питание НКИ – автономное, от батареи. В комплекте с НКИ поставляется ПО для обработки электроэнцефалограммы – Кортекс [9]. ПО Кортекс устанавливается на компьютер под управлением ОС Windows. Коммуникация с НКИ осуществляется по протоколу Bluetooth. ПО Кортекс распознает состояния сознания, на которые натренирован пользователь, и сохраняет их. Доступ к распознанным состояниям осуществляется по протоколу TCP/IP с помощью http-запросов. Таким образом, можно получить последнее распознанное состояние сознания пользователя и использовать его для нейропилотирования и управления роботом.

В качестве социального робота возможно использование робота NAO от компании Softbank/Aldebaran Robotics. NAO – автономный программируемый человекоподобный робот с 25 степенями свободы, работает под управлением ОС на базе Linux, оснащён видеокамерой, микрофоном, динамиками, тактильными датчиками, Ethernet, WiFi, поддержкой стека протоколов TCP/IP.

Работа с НКИ производится в два этапа. Первый этап – обучение. Пользователь записывает состояния своего сознания, концентрируясь на определенном объекте материального мира, либо на воспоминании, идее или мысли. Проще всего концентрироваться на материальных объектах, вызывающих сильные эмоции, например, на изображениях, музыке, видео и т.д. Обучение НКИ производится с использованием ПО Кортекс. Подробнее процесс обучения описан в руководстве по эксплуатации [10]. После того как пользователю удается стабильно вызывать четыре разных состояния сознания, можно переходить к следующему этапу – управление роботом. На данном этапе пользователь закрепляет навыки концентрации, управляя роботом, в рамках некоторого сценария.

В рамках реализации проекта по гранту «Развитие-НТИ» № 44682 «Разработка нейросетевых алгоритмов интеллектуальной робототехнической системы поддержки, обучения и развития ребенка» было реализовано два базовых приложения:

• ПО, реализующее управление роботом через НКИ (позволяет научить детей базовым способам управления роботом);

• ПО, реализующее терапевтическую функцию для детей с ОВЗ (аутизм или синдром дефицита внимания).

Реализация. Рассмотрим архитектуру системы. Схема взаимодействия всех компонентов системы представлена на рис. 1. Пользователь одевает НКИ и запускает веб-приложение (WebApp) [11, 12]. На экран выводится эмоциональный контент, на котором должен кон-

центрироваться пользователь. В нашем случае это четыре изображения (рис. 2). Каждое изображение связано с состоянием сознания пользователя и соответствует определенному действию робота. Концентрируясь на одной из картинок, пользователь может управлять роботом. Backend веб-приложения лежит на веб-сервере. Веб-сервер, с помощью CGI-скриптов на языке python, запрашивает последнее распознанное состояние у ПО Кортекс трижды в секунду. Если пользователю удалось сконцентрироваться, веб-сервер посылает команду роботу, который ее исполняет. Робот может выполнять различные действия, которые определяются интерактивным сценарием.

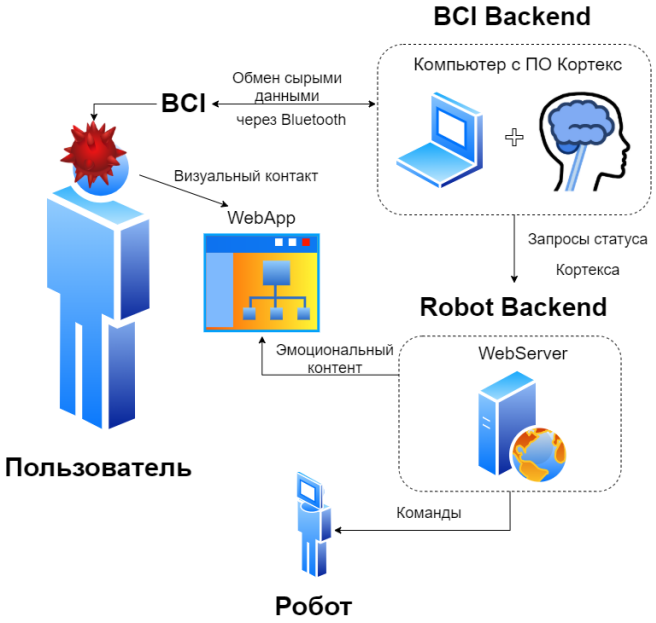


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов разработанной системы

При использовании приложений возможна реализация нескольких игровых сценариев:

• «Лава» – робот находится внутри геометрической фигуры, нарисованной на полу, например прямоугольника. Внутри прямоугольника безопасно, снаружи – горячая лава. Пользователю необходимо управлять роботом, концентрируясь на четырех состояниях сознания, каждому из которых присвоено движение робота (шаг вперед, назад, влево, вправо). Пользователю необходимо переместить робота от одного края прямоугольника к другому, не выходя за его пределы. В случае

выхода за пределы прямоугольника пользователь проигрывает и должен начать заново (робот наступил в лаву). Увеличивать сложность можно, уменьшая размеры фигуры, меняя ее форму и тд.

• «Лабиринт» – робот находится внутри лабиринта, представляющего собой набор линий, расчерченных на полу и образующих «стены». Пользователь должен управлять роботом с помощью НКИ таким образом, чтобы робот прошел лабиринт. Робот не может проходить сквозь «стены». Можно увеличивать сложность, усложняя лабиринт.

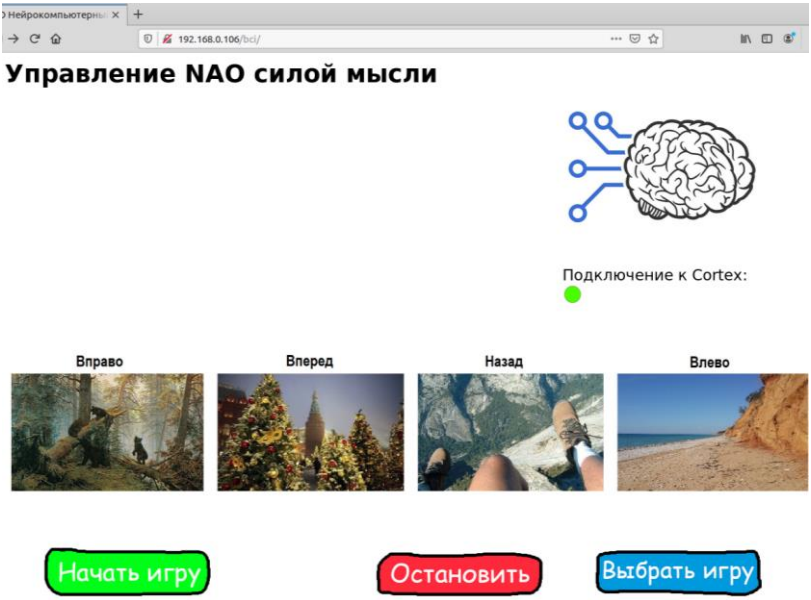


Рис. 2. Интерфейс реализованного прототипа веб-приложения

Испытания. Испытания проводились в лаборатории робототехники и искусственного интеллекта ТУСУР. В качестве пользователей выступали сотрудники лаборатории, которые упражнялись в тренировке концентрации. В качестве эмоционального контента использовались картинки, вызывающие сильные эмоции у пользователя. В результате удалось управлять движениями робота в течение небольшого периода времени. В ходе испытаний было выяснено, что упражняться необходимо в спокойной обстановке, без посторонних звуков и отвлекающих факторов. Разработанное веб-приложение, набор вспомогательных CGI-скриптов и приложение на роботе выдержали испытания и будут использованы в дальнейших разработках.

Заключение. В работе представлены результаты деятельности лаборатории робототехники и искусственного интеллекта по разработке программно-аппаратных комплексов, использующих НКИ, и социального робота для образовательных целей. Проведен литературный обзор, разработаны архитектура системы, два программных комплекса, проведены испытания. Показана возможность управления роботом через нейроинтерфейс, реализован дополнительный канал взаимодействия через связанное с роботом веб-приложение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Д. Через 10 лет количество профессий, которых сейчас не существует, удвоится или утроится // WorldSkills Russia. – URL: https://worldskills.ru/media-czentr/novosti/dmutrui-medvedev-cherez-10-let-koluchestvo-professui-kotorih-seichas-ne-syshestvyet-ydvoutsya-ulu-ytroutsya.html (дата обращения: 02.03.2020).
2. Levine S. P. et al. A direct brain interface based on event-related potentials // IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering. – 2000. – Т. 8, № 2. – С. 180–185.
3. Gomilko S., Zimina A., Shandarov E. Attention training game with aldebaran robotics NAO and brain-computer interface // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham, 2016. – P. 27–31.
4. Шандаров Е.С., Зимина А.Н., Ермакова П.С. Анализ поведения робота-ассистента в рамках разработки сценариев взаимодействия робот – ребенок // Гуманитарная информатика. – 2014. – № 8. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-povedeniya-robota-assistenta-v-ramkah-razrabotki-stsenariev-vzaimodeystviya-robot-rebenok (дата обращения: 05.05.2020).
5. Зимина А.Н., Ример Д.И., Соколова Е.В., Шандаров Е.С., Шандарова О.Е. Антропоморфный робот-помощник воспитателя дошкольного учреждения: матер. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2015. – Ч. 1. – С. 108–113.
6. Павлова А.А., Тертишная О.В., Шандаров Е.С. Детская развивающая игра на платформе автономного робота NAO: матер. междунар. конф. «Когнитивная робототехника». – Томск: ИД ТГУ, 2018. – 100 с.
7. Zimina A., Zolotukhina P., Shandarov E. (2017, September). Robot-Assistant Behaviour Analysis for Robot-Child Interactions // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham. – P. 219–228.
8. Проказина И.Ю. Разработка сценариев «робот–ребенок» для социального робота / И.Ю. Проказина, О.В. Тертишная, А.А. Павлова и др. // Сб. изб. статей науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019». – 2019. – Ч. 4. – С. 301–304.
9. Нейроботикс. – URL: https://neurobotics.ru/repo/cortex/Cortex-Manual-RUS.pdf (дата обращения: 03.02.2020).
10. Бобе А.С., Конышев Д.В., Пономарёв А.А., Ходаковский М.В. Кортекс. Св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018612631, 21 февраля 2018 г.
11. Полынцев Е.С. Система интеграции социального робота и интерактивного web-приложения / Е.С. Полынцев, А.А. Климов, А.Е. Кодоров,

И.Ю. Проказина / Сб. изб. статей науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2019». – 2019. – Ч. 4. – С. 299–301.

12. Климов А.А., Полынцев Е.С., Шабалин И.Д., Шандаров Е.С. Система управления приложениями для социального робота: матер. докладов XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления» (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 108–110.

УДК 004.021

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНЫМ РОБОТОМ-ФУТБОЛИСТОМ НА БАЗЕ ROBOTIS BIOLOID

И.Д. Шабалин, А.А. Согомонянц, Е.С. Полынцев, И.Ю. Проказина, В.В. Желонкин, студенты; Е.С. Шандаров, ст. преп., зав. ЛРИИ

г. Томск, ТУСУР, каф. ЭП, каф. ФЭ, shabalin_ilya_omu@mail.ru

Разработано программное обеспечение системы управления человекоподобным роботом для игры в футбол в юниорских лигах международного чемпионата RoboCup. В работе рассмотрены принципы взаимодействия робота со средой во время игры в футбол, стратегия игры, представлены концептуальные решения игры в футбол на бюджетной, маломощной модели гуманоидного робота.

Ключевые слова: RoboCup, Bioloid, TrackigCam, робофутбол, человекоподобный робот, система управления.

Международный чемпионат по робототехнике RoboCup возник в 1997 г. как часть инициативы университетского сообщества по стимулированию разработок в области робототехники и искусственного интеллекта [1]. Соревнования в чемпионате проводятся в рамках соответствующих лиг официальных дисциплин в двух больших категориях: RoboCup Major (соревнования команд университетов) и RoboCup Junior (RCJ), где соревнуются команды школьников и студентов младших курсов вузов.

Инициатива RoboCup активно поддерживается в России. Российские команды, преимущественно представленные в младшей лиге, ежегодно занимают места на соревнованиях RoboCup мирового уровня [2]. Долгое время возможность участия в футболе человекоподобных роботов была доступна только для «взрослых» лиг RoboCup: Humanoid KidSize (высота 40–90 см), TeenSize (высота 80–140 см) и AdultSize (высота 130–180 см). Рыночная стоимость моделей платформ, позволяющих участвовать в данных регламентах, является достаточно высокой. Так, например, одна из популярных платформ Robotis Darwin-OP имеет минимальную стоимость от 1,45 млн руб. на одного робота. Высокие требование к компетенциям команд также создают существенный барьер для участия юниоров в данных лигах.

Начиная с 2014 г. на базе ЛРИИ ТУСУР активно ведётся и продвигается создание принципиально новой лиги футбола человекоподобных роботов для юниоров RCJ Humanoid Soccer [3]. Ключевым фактором для создания лиги, доступной широкому кругу учащихся школ и вузов, является разработка недорогой и простой в освоении платформы человекоподобного робота. Платформа Robotis Bioloid Premium является сравнительно недорогой (рыночная стоимость 156 тыс. руб.), распространенной и легкой в освоении базой человекоподобного робота. Оснащение базовой конструкции подвижным модулем технического зрения позволяет расширить функциональность платформы, например для игры в футбол.

Архитектура. Разработка концептуально новой платформы создает ряд требований в виде базы минимального, необходимого программного обеспечения (ПО). ПО для футболиста можно разбить на следующие блоки (рис. 1): Locomotion – примитивы движений робота-футболиста [4]; Vision – блок технического зрения (в нашем случае базируется на модуле TrackingCam [5, 6]); Navigation – ПО, ответственное за автономное взаимодействие робота с окружением и его навигацию; Control – блок, связывающий все вышеуказанные блоки и отвечающий за стратегию поведения робота на поле.

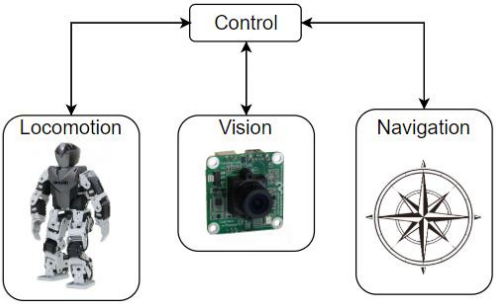


Рис. 1. Архитектура ПО

Блок управления. Блок управления роботом (Control) на программном уровне является бесконечным циклом, поочерёдно вызывая и опрашивая блоки Locomotion, Vision и Navigation. В начале цикла программа проверяет следующий ряд параметров: упал ли робот, текущее положение головы, наличие объектов в поле зрения объектива камеры (например, мяча), Исходя из указанных выше параметров, программа определяет текущее состояние игры и выполняет последовательность необходимых действий для её успешного продолжения. Возможно выполнение следующих функций:

Система «упал-встал». В футболе падение роботов является одной из основных причин остановки и завершения игры без результата. Отсутствие адаптивной системы движения роботов, частые столкновения между роботами команд и т.п. делают падения роботов в ходе игры неизбежными. Создание стабильно работающей системы по определению положения робота на поле является строго необходимой частью ПО.

В ходе проведенной работы было исследовано и использовано несколько вариантов системы «упал-встал». Методика, позволяющая добиться определения состояния падения робота и последующего поднятия практически в 100% случаев, была достигнута следующим образом: большие примитивы движений блока Locamotion (ходьба, повороты корпуса, пинок и т.д.) разбивались на группы покадровых анимаций; в промежутке кадров воспроизведения таких анимаций опрашивался датчик-акселерометр для выявления степени раскачки корпуса во время движения робота. По следующей формуле определялось среднее значение отклонения датчика от статичного положения:

$$|S_N| = \sum_{i=1}^{N} \frac{A_0 - A_N}{N},$$

где N – число кадров в примитиве, A_0 – эталонное значения датчика в состоянии покоя, A_N – значения датчика на N-м кадре.

При падении и горизонтальном положении корпуса робота раскачка и отклонение акселерометра были минимальны. В таком случае, робот успешно распознаёт падение на поле и переходит в фазу подъема. Условия падения выглядят следующем образом:

$$\begin{cases} F = 1, & |S_N| < 10; \\ F = 0, & |S_N| > 10, \end{cases}$$

где F – функция падения; $F = 1$, если робот упал, $F = 0$, если не упал.

Определение положения падения происходит за счет камеры, в случае если камера направлена вверх, она фиксирует сильное внешнее освещение и робот встает со спины. Аналогично и для вставания с живота, в таком случае камера видит черное пятно во весь кадр.

Перемещение по полю. Часть функций и условий по перемещению робота по полю выполняет блок Navigation при постоянном взаимодействии с блоком Vision. Можно выделить две фазы: отсутствие и присутствие мяча в кадре. В первом случае робот начинает ходить по полю с траекторией в виде циклоиды. При обнаружении мяча наступает вторая фаза.

Вторая фаза является набором функций и условий подхода к мячу для последующего удара. Центрируя мяч относительно кадра ка-

меры и опираясь на информацию о положении сервоприводов головы, робот совершает необходимые движения из блока Locomotion:

– Голова направлена вперёд и поднята вверх – идти прямо.

– Голова направлена в левый или правый бок – идти налево или направо соответственно.

– Голова направлена вперёд и опущена вниз под малым углом к корпусу – завершение фазы перемещения робота и переход к началу осуществления удара по мячу.

Удар по мячу. Удар по мячу осуществляется в тот момент, когда мяч находится в центре кадра, а камера наклонена вниз с помощью сервоприводов головы под максимально возможным углом, от стандартного расположения. Выбор ноги для удара происходит в зависимости от того, с какой стороны от центра координат кадра находится центр мяча.

Испытания

Система успешна прошла тестирование в лабораторных условиях (рис. 2) и приняла участие в следующих выставках и соревнованиях:

– региональный этап RoboCup Russia 2019, г. Москва;

– Российский национальный этап RoboCup Russia Open 2019, г. Томск;

– выставка достижений молодых ученых Рост.up 2019, г. Томск;

– Международный чемпионат стран Азиатско-Тихоокеанского региона RoboCup Asia-Pacific 2019, г. Москва.



Рис. 2. Проведение испытаний

Заключение. Таким образом, в результате работы по созданию базовой платформы человекоподобных роботов-футболистов для юниорской лиги был разработан комплекс ПО, реализующий систему управления роботом. ПО позволяет выстраивать стратегию игры в футбол и осуществляет необходимые взаимодействия робота с окружающей средой во время игры. Поскольку в образовательных учреждениях РФ уже имеется достаточно большая база человекоподобных

роботов Bioloid, можно предположить, что данная лига будет активно развиваться, используя подходы, описанные в данной работе. Отметим, что предлагаемый прототип платформы дает широкие возможности по модификации как с точки зрения оборудования, так и с точки зрения ПО роботов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин А.Л., Станкевич Л.А., Шандаров Е.С. Международные соревнования роботов по футболу RoboCup и перспективы участия в них российских команд // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 24–29.

2. Гомилко С.И. и др. Команда роботов-футболистов лиги ROBOCUP HUMANOID KIDSIZE // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 3. – С. 11.

3. Шабалин И.Д. и др. Антропоморфный робот-футболист для младшей лиги на платформе ROBOTIS BIOLOID // Когнитивная робототехника: матер. III междунар. конф. (21–23 ноября 2018 г.) / под ред. В.И. Сырямкина. – Томск: ИД ТГУ, 2018. – Р. 52–53.

4. Gomilko S. Robot soccer team for RoboCup humanoid kidsize league // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Springer, Cham. – 2016. – P. 181–188.

5. Шабалин И.Д., Шандаров Е.С. Система технического зрения на базе TrackingCam // Сб. изб. статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 138–141.

6. Шабалин И.Д., Шандаров Е.С. Использование модуля технического зрения TrackingCam для построения мобильного робота на базе Arduino // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Томск: В-Спектр, 2018. – Т. 1. – С. 199–200.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ПОДСЕКЦИЯ 1.1
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

*Председатель – **Тисленко В.И.**, проф. каф. РТС, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Захаров Ф.Н.**, доцент каф. РТС, к.т.н.*

Н.К. Блинковский
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ПЛАВУЧИХ ЗНАКОВ НАВИГАЦИОННОГО ОГРАЖДЕНИЯ 11
Д.О. Ноздреватых, А.С. Аникин
МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ РАДИОПЕРЕДАТЧИКА РЕТРАНСЛЯТОРА СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ 14

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., доцент*

В.В. Курикалов, В.С. Кашина
GaAs-МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДВОЙНОГО БАЛАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ С ВЫСОКИМ ПОКАЗАТЕЛЕМ IP3..... 18
А.А. Арутюнян, К.С. Колесов
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ МОДУЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПЛАСТИКОВЫХ КАРТ 22

ПОДСЕКЦИЯ 1.3
РАДИОТЕХНИКА

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

Т.А. Чепко
АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ТЕЛЕГРАФНЫХ УРАВНЕНИЙ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ 25

Д.А. Голов
СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИИ 3-ГО ПОРЯДКА В СВЧ-УСИЛИТЕЛЯХ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА 29
А.О. Шунин
РАСЧЁТ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИОДА ГАННА НА ОСНОВЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК 32
Е.Д. Тихонова
МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОСНОВОПОЛАГАЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСНЫХ СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ, НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА 35

ПОДСЕКЦИЯ 1.4

АУДИОВИЗУАЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЙ СЕРВИС

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

Т.М. Акаева
АДАПТИВНАЯ МЕДИАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ 38
Г.Е. Эдель
ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ NVIDIA CUDA 41
Т.Ю. Гребёнкина, В.А. Куракин
АНАЛИЗ ПРЕДОБРАБОТКИ И АУГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ 44
О.А. Нейфельд, А.С. Рудникович
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ЦВЕТЕ ПРИ БИНАРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ТАЙМ-КОДА ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ 47
А.А. Новгородов, А.С. Рудникович
ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ТИПА АВТОКОДИРОВЩИК В ЗАДАЧАХ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ 51
А.А. Смашная
ВНЕДРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМООТНОШЕНИЯМИ С КЛИЕНТАМИ «GO-CRM» С ПОМОЩЬЮ КОЛИЧЕСТВЕННОГО МЕТОДА СРАВНЕНИЯ 55

ПОДСЕКЦИЯ 1.5

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА

*Председатель – **Рогожников Е.В.**, доцент каф. ТОР, к.т.н.;*
*зам. председателя – **Демидов А.Я.**, проф. каф. ТОР, к.ф.-м.н.*

В.Е. Баранина
РЕАЛИЗАЦИЯ СОВМЕЩЕННЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ QPSK-МОДЕМА 58

А.Б. Гомбоин
СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО БЕСПРОВОДНОМУ КАНАЛУ С ПОМОЩЬЮ NRF24l01 61

А.А. Игумнова, Н.А. Игумнова
ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ MSK-МОДУЛЯЦИИ..... 64

Е.М. Савченко, А.Д. Першин, А.А. Любшов
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СВЧ-ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С РАБОЧИМ ДИАПАЗОНОМ ЧАСТОТ ДО 6 ГГц 67

Е.В. Николаенко, Я.В. Крюков
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ И ПОДАВЛЕНИЕ ЛОЖНОГО СИГНАЛА GPS 70

А.Д. Конопля, А.В. Романов
РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА «КОДИРОВАНИЕ И МОДУЛЯЦИЯ»..... 73

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

*Председатель – **Коцубинский В.П.**, доцент каф. КСУП, к.т.н.;*
*зам. председателя – **Винник А.Е.**, н.с. каф. КСУП*

К.В. Гончаров, А.Н. Горитов
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ К ЗАДАЧЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МНОГОЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА 77

В.В. Третьяков, В.С. Швоев, А.А. Изюмов
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ В ВИРТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ MS ROBOTIC DEVELOPER STUDIO ЛИГИ RESCUE SIMULATOR 80

А.А. Изюмов, А.Е. Винник, Н.Ю. Хабибулина
СИМУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА 83

И.А. Кремлев
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА) ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ..... 87

Д.А. Мяхор
РАЗРАБОТКА ШИРОКОФОРМАТНОГО УСТРОЙСТВА С ЧПУ ДЛЯ ПЕЧАТИ ОБЪЕКТОВ ФОТОПОЛИМЕРНЫМИ ЧЕРНИЛАМИ 89
Ю.О. Лобода, З.А. Гасымов, А.Ю. Любимов
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ДЕТЕЙ С РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА 92
Г.К. Ноздрин
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ПАЦИЕНТ» 95
А.В. Кривобородько, В.А. Присяжнюк, Е.Д. Савельев, А.В. Кретов
КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИНЫ НА BLUETOOTH УПРАВЛЕНИИ ...98
А.А. Изюмов, И.А. Шестеров, Ю.А. Шурыгин
ЗАХВАТ ОБЪЕКТА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМОЙ С МАНИПУЛЯТОРОМ НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560.....100
А.А. Изюмов, И.А. Шестеров, В.П. Коцубинский
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГРАДУИРОВКИ ПРИВОДОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ С МАНИПУЛЯТОРОМ НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560.....104
А.Д. Громов, В.В. Наркевич, А.Б. Тогузбаева, Д.Д. Шелухин
РОБОТ-ЧЕРТЕЖНИК 107
А.А. Изюмов, А.Е. Винник, Н.Ю. Хабибулина
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА 110
Д.Ю. Журавлев
УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВИДЕОИНФОРМАЦИИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО РОБОТА.....112

ПОДСЕКЦИЯ 1.7
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

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

А.А. Метель, И.М. Добуш, А.С. Сальников, А.А. Калентьев
АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТКА СВЧ-ИНТЕГРАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДИАПАЗОНА DC – 4 ГГц НА ОСНОВЕ 0,5 мкм GaAs-EpHEMT-ТЕХНОЛОГИИ 116
Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа, А.А. Суворов
ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ 119

СЕКЦИЯ 2
ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1
ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИОМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – **Еханин С.Г.**, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент*
*зам. председателя – **Романовский М.Н.**, доцент каф. КУДР, к.т.н.*

Н.К. Афанасьев, А.С. Степанова, А.В. Кинах
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (ВАХ) СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ 123
К.Е. Макарова, П.А. Надеев
ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО РАДИОИЗОТОПНОГО МЕТОДА В ОЦЕНКЕ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА 126
Д.С. Слизевич
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРИКРОВАТНОЙ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ГЕМОСТАЗА 129

ПОДСЕКЦИЯ 2.2
РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Лощилов А.Г.**, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, начальник СКБ «Смена», к.т.н.;*
*зам. председателя – **Бомбизов А.А.**, начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

Е.А. Иванчикова, А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова
ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИРОВКИ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ 133
М.А. Канина
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕИДЕАЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УЗЛОВ ВХОДНОГО БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ 136
Г.А. Малютин, В. Поздняков
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ПО ИЗМЕРЯЕМЫМ ПАРАМЕТРАМ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОДЛОЖЕК 139
Д.В. Науменко, И.Е. Лысенко, С.А. Синютин, О.А. Ежова
МЭМС-СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ТОРСИОННЫЙ ПОДВЕСОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 143

К.А. Сердюков, А.А. Новикова
ИЗМЕРИТЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД.....147
А.К. Пащенко
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВНУТРИ
ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ BLUETOOTH.....150
А.К. Пащенко
УСТРОЙСТВО ЖУРНАЛИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ПЧЕЛИНОГО УЛЬЯ.....153
А.А. Новикова, К.А. Сердюков
ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ
ТКАНИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ.....155
А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ПОРШНЕВОГО ДОЗАТОРА ПРОВОДЯЩИХ ПАСТ 157
А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова, Е.А. Иванчикова
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ПЛАСТИКА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ
СВЧ-УСТРОЙСТВ 160

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.*

Л.В. Долматова
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК ITO
НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ.....163
М.М. Михайлов, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, В.В. Каранский
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ
И КВАНТАМИ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА ПОРОШКА $BaSO_4$.....165
В. Костенко
ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВУЮ
ПЕРЕСТРОЙКУ ЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ.....168
Д.А. Лагаев
ИССЛЕДОВАНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕЙ КОМПОНЕНТЫ ТОКА
УТЕЧКИ В КНИ-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ КОСМИЧЕСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ 172
И.П. Выборнов
БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
КРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕТОДИОДОВ.....174
А.В. Казаков, А.В. Медовник, Т.Э. Юлдашбаев
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭМИССИОННОГО ЭЛЕКТРОДА
НА ГЕНЕРАЦИЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В ФОРВАКУУМНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ.....177

А.А. Зенин
ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЯ СРЕДНЕГО ВАКУУМА 180

ПОДСЕКЦИЯ 2.4
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Михальченко Г.Я.**, директор НИИ ПрЭ, д.т.н., проф.;*
*зам. председателя – **Семёнов В.Д.**, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.*

Е.А. Чеботарев, Д.Б. Бородин
ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СХЕМОЙ ДВОЙНОГО НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА 183
И.Е. Гедзенко, В.А. Кабиров, В.Д. Семёнов
ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РЕВЕРСИРОВАНИЕМ ТОКА НАГРУЗКИ 186
Ю.В. Надымова, В.Д. Семенов, С.Г. Малофиенко
ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА УГЛА ПОВОРОТА 190
А.А.Р. Рахим
ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 193
А.А. Дубина, А.Е. Грезева, П.А. Стрельников
ОБРАТНОХОДОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МЯГКОЙ КОММУТАЦИЕЙ СИЛОВОГО КЛЮЧА И КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ 196
И.М. Васильев, А.И. Солдатов
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 201

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.*

А.Д. Безпалый
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ, ИЗМЕНЕННОГО ПРИ ИНДУЦИРОВАНИИ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ 205

Д.И. Дудник
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ПРОПУСКАЮЩИХ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР 208
М.Н. Гаппарова, Д.К. Романенко, А.В. Щукин, А.С. Перин
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ СВЕТОВОГО ПУЧКА В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА 211
Т.Л. Григорян
ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ДАЛЬНОМЕРАМИ 215
К.В. Короткова, К.П. Мельник
ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В КРИСТАЛЛАХ КТР .. 218
Е.В. Бакаулова, К.Б. Кемелханова, К.М. Мамбетова
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ 220
П.К. Сафронова
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРАЗМЕРНЫХ ФОТОННЫХ РЕШЕТОК БЕССЕЛЕПОДОБНЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ 224
А.В. Михайленко, К.Г. Аксёнов
СПЕКТР ОПТИЧЕСКОГО ОТРАЖЕНИЯ СТРУКТУРЫ GaN/Al_2O_3 227
В.А. Горончко, М.М. Михайлов
ИЗУЧЕНИЕ ИК-СПЕКТРОВ ПОЛИПРОПИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ZrO_2 229
М.М. Михайлов, О.А. Алексеева, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, В.В. Каранский
СИНТЕЗ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ $BaTi_{(1-x)}Zr_xO_3$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiO_2 232
В.В. Каранский
ВЛИЯНИЕ КВАНТОВ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКА ZnO, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ SiO_2 235

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – **Заболоцкий А.М.**, проф. каф. ТУ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

А.А. Дроздова
СОЗДАНИЕ ЭКВИВАЛЕНТА СЕТИ ПО MIL-STD-461 G ДЛЯ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ 239

А.А. Дроздова
АНАЛИЗ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СИЛОВОЙ ШИНЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА 243
С.Х. Карри, Р.С. Суровцев
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЯЧЕЕК ДИСКРЕТИЗАЦИИ МОДЕЛИ МЕАНДРОВОЙ ЛИНИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛНОВОЛНОВОГО АНАЛИЗА 247
Д.В. Клюкин, А.А. Квасников
РАСЧЕТ ПОГОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 251
А.М. Лакоза, В.П. Костелецкий, Е.С. Жечев
ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДРОССЕЛЕМ 254
И.И. Николаев
СИЛОВАЯ ШИНА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С КОАКСИАЛЬНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ 257
Р.С. Суровцев, А.В. Носов, Е.А. Сердюк
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ ПО АНАЛИТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ 260
А.Е. Максимов, И.А. Онищенко
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПЕРЕКРЕСТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ 263
А.А. Синельников, А.В. Чуб, Е.С. Жечев
КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ЗЕРКАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОГО МОДАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КОНЦАХ ПАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ 266
И.А. Скорняков
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЛАГОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА АМПЛИТУДУ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НАВОДОК В ПАРЕ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЙ 269
Е.С. Варзин, А.В. Носов
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ МЕАНДРОВОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ 273

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

*Председатель – **Туев В.И.**, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.;*
*зам. председателя – **Солдаткин В.С.**, доцент. каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

К.Н. Афонин
РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО НАПРЯЖЕНИЯ СВЕТОДИОДНОЙ НИТИ 277

А.П. Шкарупо, В.И. Туев, И.Ю. Буханцов, Д.И. Жигалина
ДНК-МИКРОЧИП, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ПЕЧАТНЫМ МЕТОДОМ 280
А.А. Максименко, Е.Л. Егорова, О.Д. Хвалёва
КОНСТРУИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСПЛЕЯ.....283
Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов
ВЛИЯНИЕ КРАСНОГО ЛЮМИНОФОРА В СОСТАВЕ ЛЮМИНОФОРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ИНДЕКС ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ СВЕТОДИОДА БЕЛОГО ЦВЕТА СВЕЧЕНИЯ.....286
Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов, А.В. Кулешов, Д.В. Черных, Ю.В. Юлаева
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОДНОРОДНОСТЬ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ.....288
Е.С. Ганская, Д.В. Кожокару, Р.Г. Герасимов, А.В. Кулешов, И.В. Попов, Ю.В. Юлаева
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОДНОРОДНОСТИ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ СВЕТОДИОДНОГО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА.....291
Т.С. Михальченко, А.О. Шардина, Л.Ш. Юлдашова
РАСЧЁТЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ НА ОСНОВЕ УФ-ДИОДОВ 294
Д.Б. Тудупова, Р.М. Оразалы, А.И. Черепнев
АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ ДЛЯ САДОВОДСТВА 296
А.Г. Саинский, А.А. Мазеина, М.Х. Фам
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРНЫЕ АЭРОЗОЛЬНЫЕ СРЕДЫ.....298
Е.В. Шнайдер, Д.Л. Николаев, Ю.И. Стасенко
КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА ДЛЯ ОБЩЕГО И АРХИТЕКТУРНОГО ОСВЕЩЕНИЯ 302
В.И. Сиденко, А.О. Мартынова, В.Ю. Золотухин
УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО МИКРОКЛИМАТА РАБОЧЕГО ПОМЕЩЕНИЯ 305
В.В. Желонкин, А.Е. Кодоров, Е.С. Полынцев, И.Д. Шабалин, Е.С. Шандаров
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОКОМПЬЮТЕРНОГО ИНТЕРФЕЙСА И СОЦИАЛЬНОГО РОБОТА В ОБРАЗОВАНИИ 306
И.Д. Шабалин, А.А. Согомонянц, Е.С. Полынцев, И.Ю. Проказина, В.В. Желонкин, Е.С. Шандаров
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНЫМ РОБОТОМ-ФУТБОЛИСТОМ НА БАЗЕ ROBOTIS BIOLOID 312

Информационное письмо о компании ООО «СТК» – генеральном спонсоре конференции 327

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР КОНФЕРЕНЦИИ:
ООО «Системы. Технологии. Коммуникации»
(ООО «СТК»), г. Томск



ООО «СТК»
634034, г. Томск,
ул. Кулёва д. 24
http://stc-tomsk.ru/contacts/

Тел. +7 (3822) 609-708
E-mail:
info@stc-tomsk.ru

Компания «СТК» является системным интегратором в области связи и автоматизации технологических процессов. Территориально расположена в Томске. За 10 лет компанией реализовано более 170 крупных проектов в области технологической связи и автоматизации технологических процессов. Компания является технологическим партнером ТУСУРа в области разработки, систем связи и автоматизации. ООО «СТК» очень внимательно относится к выбору партнерской сети, ориентируется только на лучших из них, работает напрямую с производителями оборудования и разработчиками программных продуктов. Является платиновым партнером «Моторолы», официальным дилером «Микран», «Нека», «Серагона», «Инфинета», «Элтека», «Индустроника», «Исс», «Бевард», «Аксис», «ITV», «CISCO».

Отличительной особенностью нашей компании является комплексность в подходах построения систем и решении задач заказчика. Мы выполняем полный комплекс работ, начиная от проработки технического решения до обучения персонала заказчика и обслуживающего персонала (включая проектирование, поставку, СМР, ПНР и ввод в эксплуатацию).

ВИДЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Разработка проектной документации – разработка проектно-сметной документации для строительства систем связи и сдачи их в эксплуатацию. Подготовка необходимых документов в соответствии с принятыми нормами и техническими требованиями.

Сопровождение документации – разработка и научно-техническое сопровождение заявочных документов на получение частотных разрешений. Сопровождение документов при прохождении необходимых экспертиз. Полный комплекс работ: от подготовки и подачи заявки в госкомиссию до получения свидетельств на разрешения использования частот.

Монтажные и пусконаладочные работы – строительство «под ключ» систем связи и автоматизации, ОПС и систем видеонаблюдения на любых промышленных объектах.

Комплексная поставка оборудования – поставка оборудования комплексных системных решений от ведущих мировых производителей на любые промышленные и технологические объекты.

Собственные разработки и производство – система громкоговорящей связи «СТК-ГГС», базовая станция «СТК-ТС-TETRA», базовая станция «СТК-ТС-DMR», шкафы автоматизации «СТК-САУ», шкафы телемеханики «СТК-ТМ», телекоммуникационные шкафы «СТК-ТС», система видеонаблюдения «DIVISION».

Обучение персонала – выезд на объект и обучение специалистов заказчиков работе с оборудованием, передача системы в эксплуатацию.

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

1. Проектирование систем технологической связи, видеонаблюдения и АСУ ТП.
2. Системная интеграция в области технологической связи, видеонаблюдения и АСУ ТП.
3. Консалтинг в получении разрешений на использование радиочастот.
4. Поставка оборудования связи, видеонаблюдения и АСУ ТП.
5. Производство систем связи, видеонаблюдения и АСУ ТП.
6. Обучение персонала работе с оборудованием связи, видеонаблюдения и АСУ ТП.

ПРЕИМУЩЕСТВА

1. Практический опыт компании в решении задач связи и автоматизации.
2. Специальные свидетельства на деятельность по строительству зданий и сооружений, подтверждающие право на работу.
3. Высокое качество и надёжность поставляемого оборудования.
4. Решения только от ведущих производителей мирового уровня.
5. Высококвалифицированные специалисты с практическим опытом.
6. Законченные решения и гарантия бесперебойной работы систем.
7. Сотрудники постоянно повышают квалификацию и уровень технической подготовки, проходят регулярные тренинги и стажировки.
8. Официальные сертификаты производителей.
9. Производство – собственные производственные мощности.
10. Нам доверяют – положительная деловая репутация.

СОБСТВЕННАЯ РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ

1. **Базовая станция «СТК-ТС-DMR»** построена на элементной базе ведущих мировых и отечественных производителей. Модульная архитектура позволяет реализовать любую задачу в части построения

систем оперативной диспетчерской радиосвязи. Цифровая платформа СТК-ТС-DMR обеспечивает надежную коммуникацию персонала предприятия и управление технологическими процессами, объединяя в себе функции системы оперативно-диспетчерской радиосвязи, системы позиционирования радиоабонентов, оповещения в чрезвычайных ситуациях.

2. **Базовая станция «СТК-ТС-TETRA»** транкинговой связи стандарта TETRA предназначена для обеспечения увеличения зоны покрытия транкинговой радиосвязи. Представляет собой законченное решение в виде 19” шкафа с собственной системой резервного электропитания. Сокращенная потребность в обслуживании с выездом на место и возможность повторного использования станции в различных конфигурациях снижает эксплуатационные расходы. Малые размеры и вес упрощают транспортировку. Полная совместимость с инфраструктурным оборудованием DIMETRA IP производства Motorola Soluons.

3. **Система ГГС** построена на оборудовании ведущих мировых и отечественных производителей. Модульная архитектура позволяет реализовать любую задачу в части оповещения производственных площадок совместно с громкоговорящей и диспетчерской связью. Цифровая телекоммуникационная система оперативно-технологической громкоговорящей связи и оповещения с поддержкой IP. Цифровая платформа СТК-ГГС обеспечивает надежную коммуникацию персонала предприятия и управление технологическими процессами, объединяя в себе функции системы оперативно-диспетчерской двусторонней связи, громкого оповещения и экстренного оповещения о чрезвычайных ситуациях.

4. **Станция управления «СТК-САУ»** предназначена для автоматического управления технологическими процессами таких объектов, как дожимная насосная станция, установка предварительного сброса воды, установка подготовки нефти, центральный пункт сбора нефти, товарный парк. Станция управления осуществляет контроль параметров технологического процесса, а также выполняет функции противоаварийной защиты объекта. Станция управления может быть построена с применением контроллеров DirectLogic, Allen-Bradley (SLC-500, ControlLogix, CompactLogix, FlexLogix, MicroLogix), Modicon (Quantum, Momentum), Siemens (S7-300, S7-400).

5. **Шкаф телемеханики «СТК-ТМ».** Станция предназначена для построения системы телемеханики нефтяного или газового промысла и выполняет функции сбора, передачи информации с технологического оборудования куста скважин на верхний уровень системы ТМ. Станция ТМ строится на базе контроллера SCADAPack с модулями расширения.

6. **Система видеонаблюдения «DIVISION»** – законченное работоспособное решение, предназначенное для реализации функций технологического и охранного видеонаблюдения для нефтегазодобывающей, химической и топливной промышленности. Включает в себя весь комплекс необходимого оборудования и видеоаналитики: сервера записи и управления, рабочие места операторов, видеостены и мониторы отображения, видеокамеры внутреннего и наружного (до –60 °С) исполнения, стационарные и поворотные, взрывозащищенного и общепромышленного исполнения. Программное обеспечение, позволяющее интегрировать в единую систему видеокамеры различных производителей, интеграция с системами СКУД и ОПС, интеллектуальные функции видеоаналитики.

НАШИ ЗАКАЗЧИКИ

НОВАТЭК · СИБУР · СИБИНТЕК Обеспечивая лидерство · Газпром нефть · Роснефть

НАШИ ВЕНДОРЫ

ECI · Motorola Solutions · Микран · Cambium Networks · Cisco · Ceragon · NEC · Industronic · TRBOnet Digital Technologies · InfiNet wireless · Beward · Eltek A Delta Group Company

НАШИ КОНТАКТЫ

info@STC-TOMSK.RU
http://STC-TOMSK.RU
г. Томск, ул. Кулева, 24
8 (3822) 609-708, 905-610

Научное издание

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

По материалам
Международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2020»

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В двух частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Издательство «В-Спектр».
Сдано на верстку 15.04.2020. Подписано к печати 15.05.2020.
Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная. Печ. л. 20,75
Тираж 100 экз. Заказ 7.

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