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

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2020

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
13–30 мая 2020 г. (в трех частях)

Часть 1

г. Томск

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

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2020

Материалы

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

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

В-Спектр
2020

УДК 621.37/.39+681.518 (063)
ББК 32.84я431+32.988я431
Н 34

Н 34 **Научная сессия ТУСУР–2020:** материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – 274 с.
ISBN 978-5-91191-437-0
ISBN 978-5-91191-438-7 (Ч. 1)
ISBN 978-5-91191-439-4 (Ч. 2)
ISBN 978-5-91191-440-0 (Ч. 3)

Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых посвящены различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также 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 978-5-91191-437-0
ISBN 978-5-91191-438-7 (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.;

- 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 Наталья Вячеславовна, 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 секция.
3-я часть – 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. 11–110)

СЕКЦИЯ 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

(стр. 111–259)

Информационное письмо о компании ООО «СТК» – *генеральном спонсоре конференции*

(стр. 269–272)

СТК
Системы.
Технологии.
Коммуникации

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

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ

А.А. Игумнова, Н.А. Игумнова, студентки каф. РТС
Научный руководитель В.А. Кологривов, доцент каф. РТС
г. Томск, ТУСУР, alna.igumnova.98@mail.ru

Приведены результаты модельного исследования нелинейной локации. Произведено сравнение вариантов моделей нелинейных локаторов при использовании различных типов зондирующих сигналов. В качестве выходного параметра используется отношение амплитуд откликов на частотах второй и третьей гармоник. Сделаны выводы о предпочтительной форме зондирующего сигнала.
Ключевые слова: нелинейная радиолокация, зондирующий сигнал, закладка типа диод, объект ложного срабатывания «ржавый болт», нелинейность ВАХ, прием на гармониках сигнала.

Нелинейные локаторы (НЛ) используются для проведения поисковых мероприятий по обнаружению и определению местоположения устройств (закладок), позволяющих негласно снимать информацию и находящихся как в рабочем, так и в «спящем» режимах [1].

Сущность данного метода локации заключается в регистрации гармоник одночастотных зондирующих сигналов, отражённых от локируемого объекта с нелинейными вольт-амперными (ВАХ) и вольт-фарадными характеристиками. Такими характеристиками обладают объекты искусственного происхождения, в составе которых имеются полупроводниковые радиоэлементы (диоды, транзисторы и т.д.), а также точечные прижимные металлические контакты [2].

Большинство производимых в мире моделей НЛ используют непрерывное излучение, то есть излучают непрерывный узкополосный сигнал. Однако существуют НЛ, работающие в импульсном режиме, что дает ряд преимуществ: меньшее потребление тока аккумуляторных батарей при хорошей конструкции передатчика. Длительность зондирующего импульса и скважность определяются расстоянием до лоцируемого объекта [1].

Кроме локации, основанной на кратных гармониках, используются НЛ с двухчастотным зондирующим сигналом и приемом на комбинационных частотах типа $f_1 \pm f_2$; $2f_1 \pm f_2$ [3].

Для исследования был выбран метод с использованием кратных гармоник отраженного сигнала.

Функциональная модель НЛ состоит из облучателя, исследуемого объекта и приемников откликов на 2-й и 3-й гармониках воздействия. Функциональная модель, представленная на рис. 1, содержит: источник зондирующих импульсов (Source), элемент задержки, имитирующий прохождение сигнала через пространство (delay), нелинейный элемент (diode), объект ложного срабатывания в виде «ржавого болта» («screw»), переключатель (Switch) вида нелинейного объекта. Прием сигнала 2-й и 3-й гармоник реализован методом синхронного детектирования с помощью перемножителей и фильтров нижних частот (LF). В схеме присутствуют регистрирующие приборы – осциллографы (Scope). Для удобства оператора в модели реализовано вычисление отношения амплитуд откликов на 2-й и 3-й гармониках, результаты вычислений выводятся на дисплей (Display).

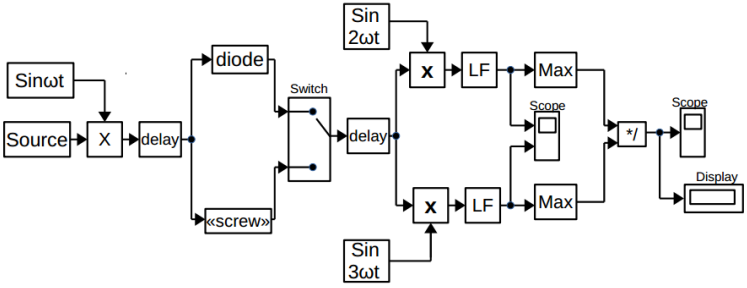


Рис. 1. Функциональная модель нелинейного локатора

В таблице представлены результаты измерений отношений амплитуд откликов 2-й и 3-й гармоник для разных типов зондирующих сигналов.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что при использовании прямоугольных импульсов самое большое отношение

амплитуд откликов на 2-й и 3-й гармониках. Это обусловлено тем, что прямоугольные импульсы имеют более широкий спектр, поэтому сильнее проявляется нелинейность облучаемого объекта.

Результаты измерений отношений амплитуд откликов

Вид импульсов	Закладка	Болт
Гауссовский импульс	5,981	0,1041
Рэлеевский импульс	7,699	0,1327
Генератор прямоугольных импульсов	8,215	0,05134

При использовании в качестве зондирующих гауссовского и релеевского импульсов также получаются вполне удовлетворительные результаты. Модели нелинейных исследуемых нелинейных элементов реализованы на основе функций th(x).

Выводы. Для исследования была реализована модель с возможностью изменения типа зондирующего воздействия и ВАХ нелинейного элемента. С помощью переключателя возможен выбор типа нелинейности.

В ходе модельного эксперимента были исследованы варианты реализации нелинейной локации. Облучатель с прямоугольным импульсом показал лучшие результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор технологии нелинейной локации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=255&lvl=04.01.02. (дата обращения: 29.01.2020).

2. Щербаков Г.Н., Шлыков Ю.А., Николаев А.В., Бровин А.В. К оценке фундаментальных пределов в нелинейной радиолокации // Спецтехника и связь. – 2008. – № 2. – С. 21–25.

3. Волынец Н.А., Кереселидзе Е.В. Способ обнаружения и распознавание объектов с нелинейной вольт-амперной характеристикой // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8. – С. 28–32.

УДК 621.3.088.7

СПОСОБ АДАПТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ В ВАТТМЕТРАХ НА ОСНОВЕ ДИОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

А.Д. Леонтьев, студент каф. РТС

Научный руководитель А.С. Загородний, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, andreyzag@micran.ru

Проект ГПО СВЧиКР-1803 «Компоненты широкополосных измерительных комплексов СВЧ»

Предложена модификация системы температурной коррекции ваттметров СВЧ на основе диодных преобразователей. Описаны мате-

матические соотношения, лежащие в основе адаптивной температурной коррекции, предложен способ коррекции, учитывающий измеряемую мощность.
Ключевые слова: измерители мощности, функция термокоррекции, аппроксимация, параболическая функция.

Главная задача системы термокоррекции – компенсация ухода показаний ваттметра от истинного значения при отклонении значения температуры от температуры при нормальных условиях.

Принцип работы ваттметров СВЧ основан на преобразовании мощности СВЧ-сигнала на диодном амплитудном детекторе в напряжение постоянного тока [1].

Диодный детектор функционирует в составе микросхемы MD-904, характеризующейся зависимостью детектируемого напряжения от температуры, приведенной на рис. 1.

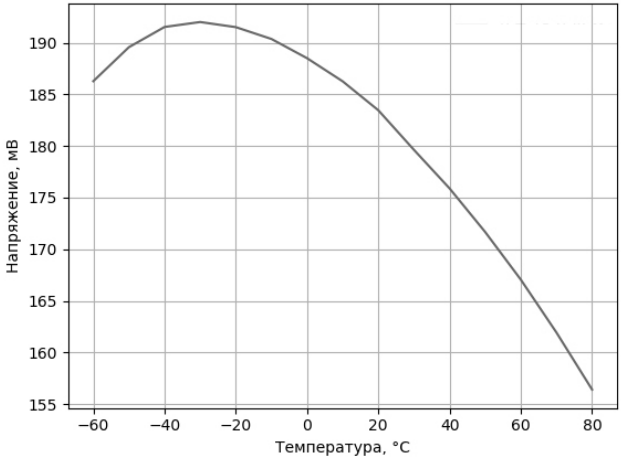


Рис. 1. Зависимость детектируемого напряжения
от температуры для микросхемы MD-904

Алгоритм системы температурной коррекции прибора можно разделить на 2 этапа: считывание данных об изменении температуры и компенсация температурных уходов [2].

Данные об изменении температуры рассчитываются на основе изменения сопротивления терморезистора серии NCP18XH103 с отрицательным ТКС, установленного непосредственно в модуле СВЧ.

Компенсация температурных уходов производится за счет деления измеренного значения напряжения на корректирующий коэффициент, который является значением функции термокоррекции при учете температуры термистора.

$$U(T) = \frac{U_0}{K_{\text{кор}}(T)}, \quad (1)$$

где U_0 – показание прибора, $K_{\text{кор}}$ – корректирующий коэффициент.

Функция термокоррекции для ваттметров PLS26, PLS50, в которых реализована описанная система, строится на основе полученных экспериментально данных о зависимости изменения детектируемого напряжения от температуры при фиксированных мощностях и представляет собой параболическую функцию [2]

$$K_{\text{кор}}(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c, \quad (2)$$

где a, b, c – коэффициенты аппроксимирующей функции, T – температура.

Во время исследования динамических характеристик ваттметров было установлено, что форма зависимости детектируемого напряжения от температуры на мощностях менее –50 дБм изменяется. В связи с этим было предложено реализовать функцию термокоррекции в виде функции от двух переменных – от температуры и мощности

$$K_{\text{кор}}(T, P) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c + f(T, P), \quad (3)$$

где $f(T, P)$ – функция, зависящая от температуры и значения входной мощности.

Задача $f(T, P)$ в выражении (3) – изменение формы функции температурной коррекции в зависимости от значения измеряемой мощности. Сделать это можно в том случае, если $f(T, P)$ также является параболической функцией, каждый из коэффициентов которой зависит от значения входной мощности:

$$f(T, P) = a_1(P) \cdot T^2 + b_1(P) \cdot T + c_1(P) \quad (4)$$

В данном случае коэффициенты a_1, b_1, c_1 будут суммироваться с коэффициентами a, b, c в выражении (3), тем самым учитывая значение входной мощности.

Предположим, каждый из коэффициентов параболической функции термокоррекции изменяется линейно и монотонно при уменьшении мощности ниже минус 50 дБм. Тогда выражения для коэффициентов a_1, b_1, c_1 будут представлять собой линейную функцию, зависящую только от мощности входного сигнала.

Для получения выражений для этих коэффициентов можно воспользоваться уравнением прямой, проходящей через две точки [3]. Первая точка – это значение коэффициента параболы при мощности более минус 50 дБм, вторая – значение этого же коэффициента при мощности минус 60 дБм. Для коэффициента a_1 можем записать:

$$a_1(P)=\left\{\begin{array}{c}0,\ \text{если}\ P>-50\ \text{дБм};\\ \dfrac{(P-(-50))\times(a_1''-a_1')}{(-60-(-50))},\ \text{если}\ P<-50\ \text{дБм}\end{array}\right\},\qquad(5)$$

где a'_1 – значение коэффициента a_1 при мощности менее –50 дБм, a''_1 – значение коэффициента a_1 при мощности –60 дБм.

Для коэффициентов b_1, c_1 выражение записывается аналогичным образом. Изменение функции термокоррекции в зависимости от уровня мощности представлено на рис. 2.

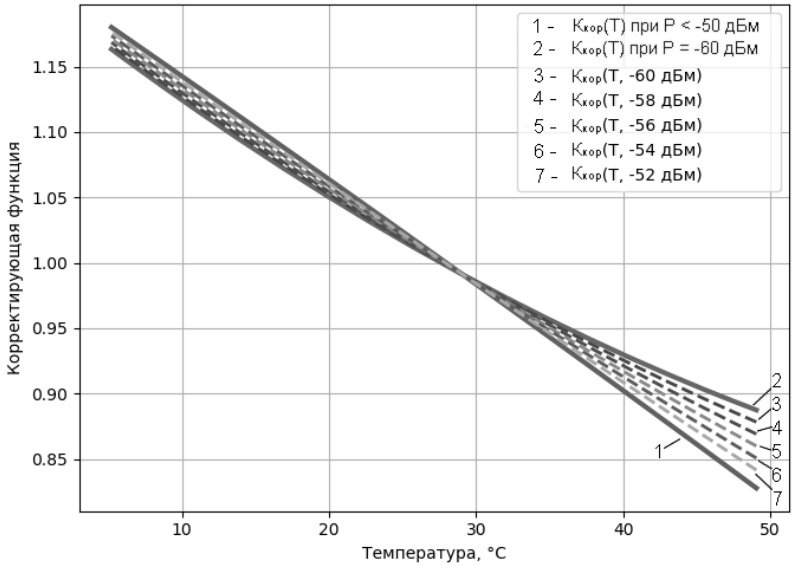


Рис. 2. Зависимость функции термокоррекции от температуры и мощности

Таким образом, модификация системы температурной коррекции ваттметров PLS26, PLS50 даёт возможность учитывать изменение формы функции температурной коррекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измерители мощности PLS26, PLS50. Руководство по эксплуатации. Общие сведения. – Микран, 2017. – 58 с.

2. Леонтьев А.Д. Алгоритм системы температурной коррекции в ваттметрах на основе диодных детекторов // Матер. VIII рег. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск, 2019. – Ч. 1. – С. 71–85.

3. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

УДК 621.396.96

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО УГЛОВОЙ КООРДИНАТЕ И ДАЛЬНОСТИ MIMO-РАДАРА С ЛЧМ-СИГНАЛОМ

К.Д. Зайков, студент каф. РТС

Научный руководитель А.С. Аникин, доцент каф. РТС

г. Томск, ТУСУР, rrb86@inbox.ru

Проект ГПО РТС-1804 «Усилители сигналов низкочастотного и высокочастотного диапазона для программно-аппаратных комплексов формирования и обработки сигналов»

В рамках ГПО РТС-1804 ведётся моделирование MIMO-радара с ЛЧМ-сигналом. На данном этапе была рассмотрена разрешающая способность радара по угловой координате и дальности. Особенность – большая часть работ с подобной тематикой, выполненной в оптике, применима к радиолокации, подобных работ мало.

Ключевые слова: разрешающая способность радара, MIMO-радар, ЛЧМ.

Разрешающей способностью системы называют способность раздельного измерения параметров двух или нескольких близко расположенных в пространстве объектов [1]. Разрешающую способность количественно принято оценивать минимальной разностью значений измеряемых параметров соседних объектов, при которых они воспринимаются системой раздельно. Для РЛС разрешающая способность является одной из основных характеристик.

Поэтому в данной работе будут представлены результаты исследования разрешающей способности MIMO-радар с ЛЧМ- сигналом. При моделировании имитировались последовательность из 5 ЛЧМ-сигналов, которые передаются 5 антеннами и принимаются антенной решёткой из 12 элементов.

В данном ГПО РТС-1804 моделируется радар, прототип которого изложен в работе [2] «Конструкция коммутируемой антенной решётки с улучшенными показателями для 77 ГГц FMCW автомобильного радара». В данной статье подробно описана структурная схема приемопередатчика, объяснён принцип работы радара и приведены характеристики сигнала.

При количественном определении разрешающей способности в оптике широко используется понятие рэлеевского разрешения. В соответствии с этим понятием два оптических сигнала считаются разрешенными, если $\Delta I > 0{,}51_{max}$ (рис. 1). Соответственно количественно разрешающая способность – это такое Δx, при котором $\Delta I > 0{,}51_{max}$.

Применимо к радиолокации можно считать, что сигналы различимы, если провал в суммарной диаграмме отличается в 3 дБ.

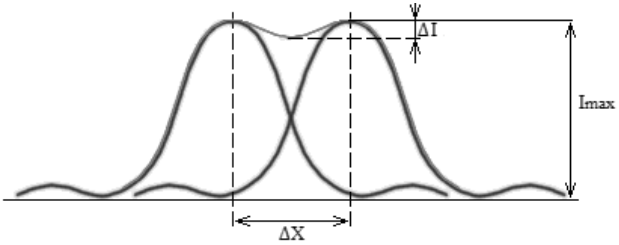


Рис. 1. Понятие рэлеевской разрешающей способности

В моделируемом радаре расстояние определяется по частоте биения, т.е. каждой частоте соответствует свой строб дальности, Таким образом анализируя спектр сигнала, можно судить о наличии цели и на каком расстоянии она находится. Так как для анализа спектра используется БПФ для 11200 отсчётов, то спектр сигнала дискретен. В получившейся модели шаг отсчёта частоты соответствует шагу дальности, равному 1,5 м. Предположим, что две точечные цели находятся на расстоянии между собой в 1,5 м, тогда сигнал биения будет иметь две соседние частоты в полученной спектрограмме. Различить сигналы нет возможности. Для того чтобы различить цели на спектрограмме, необходимо, как минимум, появление одного строба дальности между сигналами.

Анализируя вышесказанное, делаем вывод, что разрешающая способность по дальности созданной модели $\Delta R_р$ = 3 м, что подтверждается на рис. 2.

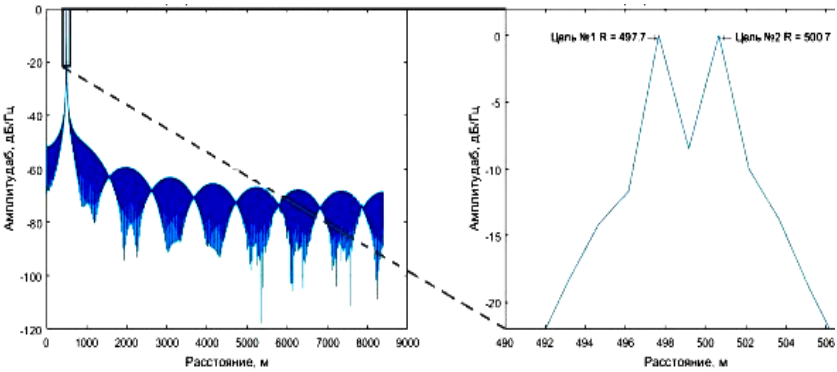


Рис. 2. Разрешающая способность по дальности,
спектрограммы сигналов биения

Согласно [3], разрешающая способность ΔR находится по формуле

$$\Delta R = \frac{c}{2\Delta f_m},$$

где Δf_m – ширина полосы девиации (в данном радаре 200 МГц).

По данной формуле ΔR = 0,75 м. Сравнивая полученные результаты, можно сказать, что разрешающая способность создаваемого радара зависит от количества отсчётов БПФ и частоты дискретизации (чем меньше частота дискретизации, тем больше ΔR_p; больше отсчетов – больше ΔR_p). Но изменение данных величин не всегда возможно, т.к. частота дискретизации ограничивается теоремой Котельникова, а количество отсчётов – памятью и быстродействием системы.

Очевидно, что разрешающая способность по угловым координатам будет зависеть от ширины ДН виртуальной АР. Диаграмма направленности строилась по полученным данным о токе и фазе на стробе дальности (который соответствует точечной цели) на каждой антенне. В результате моделирования была получена виртуальная АР с шириной ДН $2\theta_{0,5} \approx 1{,}5°$. Согласно [4], ширина ДН антенной решётки будет равна

$$2\theta_{0,5} \approx \quad 51°(\lambda/n \cdot d),$$

где n – количество антенн в АР (n = 60); d – шаг АР (d = 0,6λ).

По данной формуле $2\theta_{0,5} \approx 1{,}42°$, данные расхождения связаны с потерями значений при выполнении БПФ, вследствие чего фазовый и амплитудный фронт потеряли свою линейность.

По такому же принципу, как для разрешающей способности по дальности, найдём угловые координаты. То есть мы не сможем различить две цели, если их угловые координаты будут отличаться менее чем на 1,5°. Минимум нужно, чтобы их угловые координаты отличались на 1,5°. Но в результате моделирования получилось, что разрешающая способность равна 1,7° (рис. 3).

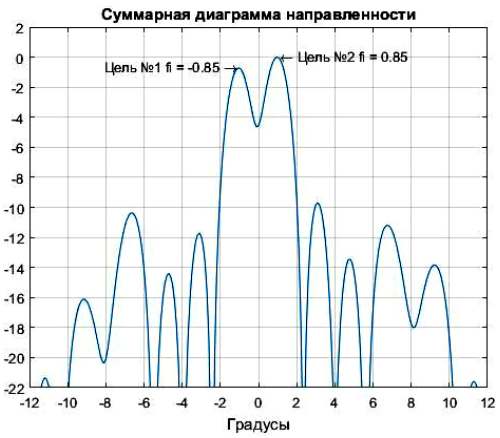


Рис. 3. Разрешающая способность по угловым координатам

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П. Радиотехнические системы: учеб. пособие / В.П. Денисов, Б.П. Дудко. – Томск: ТУСУР, 2012. – 334 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/1664

2. Doo-Soo Kim, Dong-Hee Hong, Ho-Sang Kwon, Jin-Mo Yang. A Design of Switch Array Antenna with Performance Improvement for 77 GHz Automotive FMCW Radar.

3. Очиров О.Н. Сверхкороткоимпульсное зондирование лесных сред: дис. … канд. техн. наук / Институт физического материаловедения Сибирского отд. РАН. – Улан-Удэ. – 2017.

4. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. – Ч. 2. Антенны: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2012. – 145 с.

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 621.389

СОЗДАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ТАБЛО ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ STM32

И.В. Соболинский, А.С. Ларюшин, Д.А. Михеева,
А.С. Быстрицкий, Е.А. Смирнов, студенты каф. ТОР
Научный руководитель Д.С. Брагин, ст. преп. каф. ТОР
г. Томск, ТУСУР, skinnicks@gmail.com
Проект ГПО ТОР-1903 «Разработка системы информирования, управляемой со смартфонов на базе android»

Разработано универсальное информационное табло для корпусов и аудиторий ТУСУРа, где отображена информация о том, какой преподаватель ведет в данный момент предмет и название предмета, а также номер аудитории.
Ключевые слова: плата, STM32, Android, микроконтроллер, led матрица, приложение

Цель разработки – обеспечение удобства предоставления информации на табло для посетителей на основе следующих составляющих.

Led-панель – это плоский осветительный прибор декоративного характера, предназначенный для использования в жилых, общественных и даже промышленных помещениях. Корпус каждой отдельной панели выполнен из алюминиевого сплава, который отличается отменными показателями теплопроводности. При этом роль источника света выполняют лампы led различного оттенка и мощности. В зависимости от модели число источников света может быть разным. Роль источника питания выполняет отдельный блок, который работает от сети напряжения 220 В. Поскольку данная составляющая вынесена за пределы конструкции, эксплуатация осветительного модуля не доставляет хлопот.

STM32F051 – один из самых многофункциональных микроконтроллеров. Имеет WiFi-модуль, 32-битный процессор, что обеспечивает высокую производительность. Он является полным аналогом

Arduino Uno – также работает на чипе ATmega328P (хотя можно еще встретить варианты с ATmega168), но с меньшим форм-фактором. Из-за своих габаритных размеров плата часто используется в проектах, в которых важна компактность. На плате отсутствует вынесенное гнездо внешнего питания, Ардуино работает через USB (miniUSB или microUSB). В остальном параметры совпадают с моделью Arduino Uno.

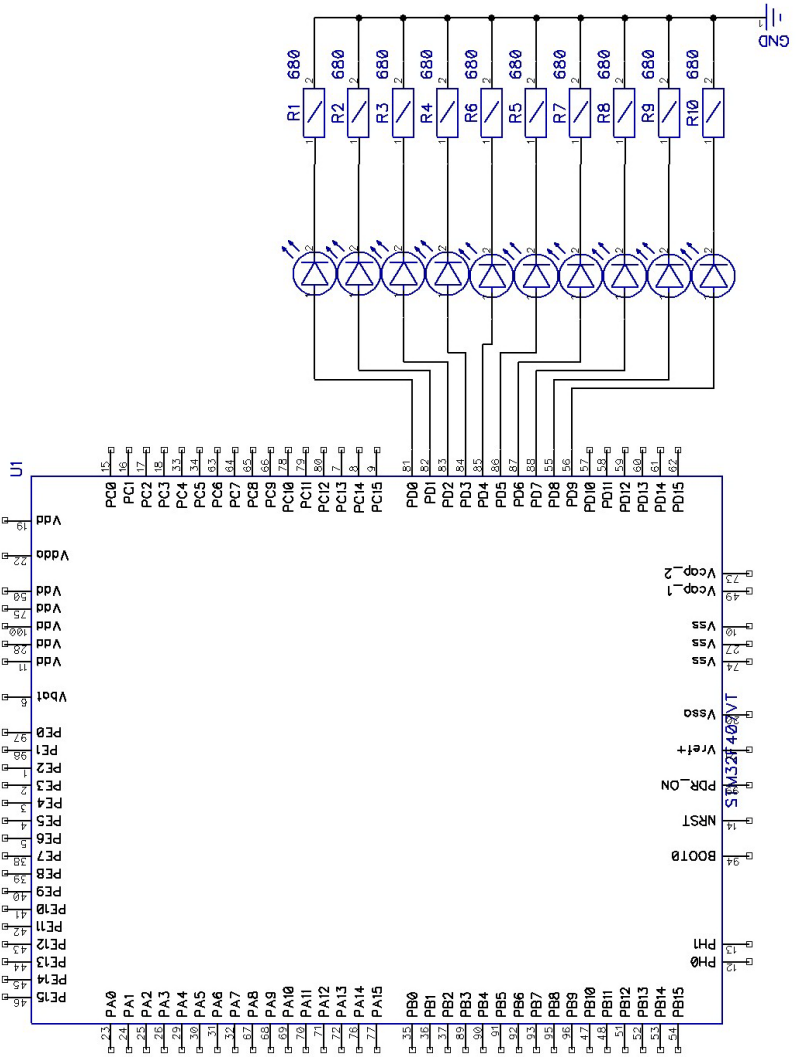


Рис. 1. Схема подключения STM32 с led-панелью

Алгоритм работы:

1. Устанавливаем приложение на телефон, заносим сообщение (могут использоваться как шаблоны, так и любое текстовое сообщение пользователя), которое обрабатывается на ESP8266.

2. После сообщение передаётся на STM32, на ней происходит проверка сообщений, исправляется и отправляется на матрицу, тем самым зацикливая сообщения на панели.

3. Отключается матрица отправкой пустого сообщения.

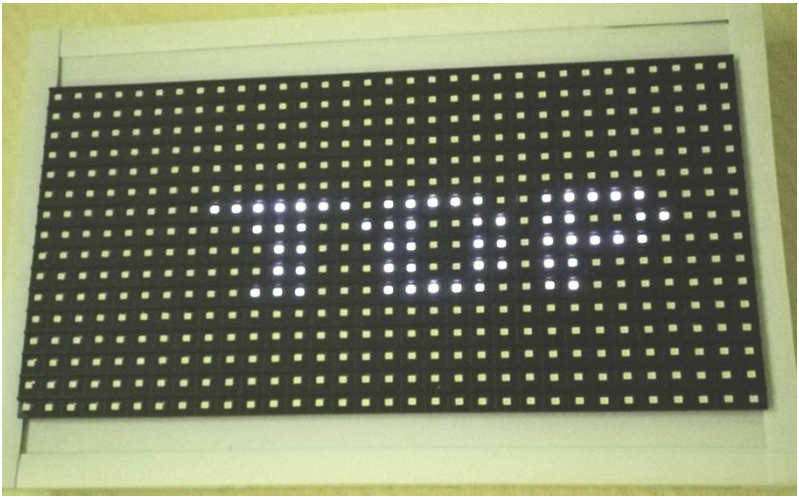


Рис. 2. Макет лабораторной установки

ЛИТЕРАТУРА

1. Матрицы СИД RGB С STM32 И DMA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://hackaday.com/2015/01/05/rgb-led-matrices-with-the-stm32-and-dma (дата обращения: 23.01.2020).

2. Программирование МК STM32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://narodstream.ru/programmirovanie-mk-stm32 (дата обращения: 18.02.2020).

3. STM32 Dot Matrix Display [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.christidis.info/index.php/personal-projects/stm32-dot-matrix-display (дата обращения: 23.01.2020).

ПОДСЕКЦИЯ 1.3

РАДИОТЕХНИКА

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

УДК 621.396

ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ ОБЕСПЕЧЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

В.С. Черный*, А.А. Донгак**, студенты каф. РТС*, ТОР**
Научный руководитель А.Ю. Абраменко, доцент каф. ТОР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vovachernyy7@gmail.com

В современном мире активно переходят от аналоговых к цифровым видам модуляции ввиду большего объёма переносимой информации. Для анализа сигналов с цифровыми видами модуляции используется специализированное программное обеспечение. В данной работе рассмотрены четыре варианта программного обеспечения от различных производителей.

Ключевые слова: PSK, QAM, измерение параметров, ПО.

Так как в будущем планируется разработка собственного программного обеспечения (ПО), необходимо определить, какие параметры требуется измерять для сигналов с цифровыми видами модуляции на основе существующих ПО. Основной акцент поставлен на самих параметрах и на том, что под ними подразумевает конкретный производитель.

В ходе работы было проанализировано четыре ПО различных производителей.

Первым было рассмотрено ПО Keysight 89600 VSA (далее – VSA) [1]. Данное ПО позволяет анализировать сигналы с различными видами цифровых модуляций (4/8PSK, 8/16/32/64/128/256/512/1024QAM). VSA используется в различных приборах компании Keysight для анализа сигналов [2].

Второе рассмотренное ПО – это SignalVu-PC-SVE фирмы Tektronix [3]. Параметры оцениваются для следующих типов сигналов: 2/4/8/16PSK, 16/32/64/128/256QAM, а также различные вариации перечисленных видов модуляций.

Третьим рассмотренным ПО стала программа «Spike» компании Signal hound [4]. Данное ПО измеряет следующие параметры сигналов с различными видами модуляций: 2/4/8/16PSK, 16/32/64/128/256QAM.

Последним рассмотрено ПО фирмы Transcom Instruments для векторного анализатора спектра A6/Micro-Rx [5].

Измеряемые параметры от различных ПО сведены в таблицу для удобства представления данных.

Измеряемые параметры различными ПО

Измеряемый параметр	Программное обеспечение			
	Keysight 89600 VSA	SignalVu-PC-SVE	Spike	A6/Micro-Rx
Freq. Err.	+	+	+	–
Gain Imb.	+	+	–	+
IQ offset	+	+	–	+
Mag. Err.	+	+	+	+
Phase Err.	+	+	+	+
Quad. err.	+	+	–	+
Amp. droop	+	–	–	–
SNR (MER)	+	+	–	+
EVM	+	+	+	+

Производители ПО дают следующие определения оцениваемых параметров:

1. Freq. Err. – ошибка по частоте, отсчитываемая от несущей частоты (на рис. 1, *а* приведено влияние данной ошибки на диаграмму созвездия).

2. Gain Imb. – рассогласование амплитуд между *I*- и *Q*-компонентами сигнала (рис. 1, *б*).

3. IQ offset – смещение центра созвездия, отсчитываемое от начала координат (рис. 1, *в*).

4. Mag. Err. – ошибка амплитуды, усреднённая по всем символам в анализируемом интервале (рис. 1, *г*).

5. Phase. Err. – усреднённая ошибка фазы для всех символов в одном интервале (рис. 1, *д*).

6. Quad. Err. – нарушение ортогональности компонент сигнала, в градусах (рис. 1, *е*).

7. Amp. Droop – среднее значение изменения величины сигнала за измеряемый интервал.

8. SNR (MER) – отношение сигнал/шум, вычисляемое по формуле (1).

9. EVM – среднее значение относительной ошибки модуляции в заданном интервале, в процентах, рассчитывается по формуле (2).

MER – коэффициент модуляционных ошибок (Modulation Error Ration), цифровой аналог SNR для квадратурных сигналов.

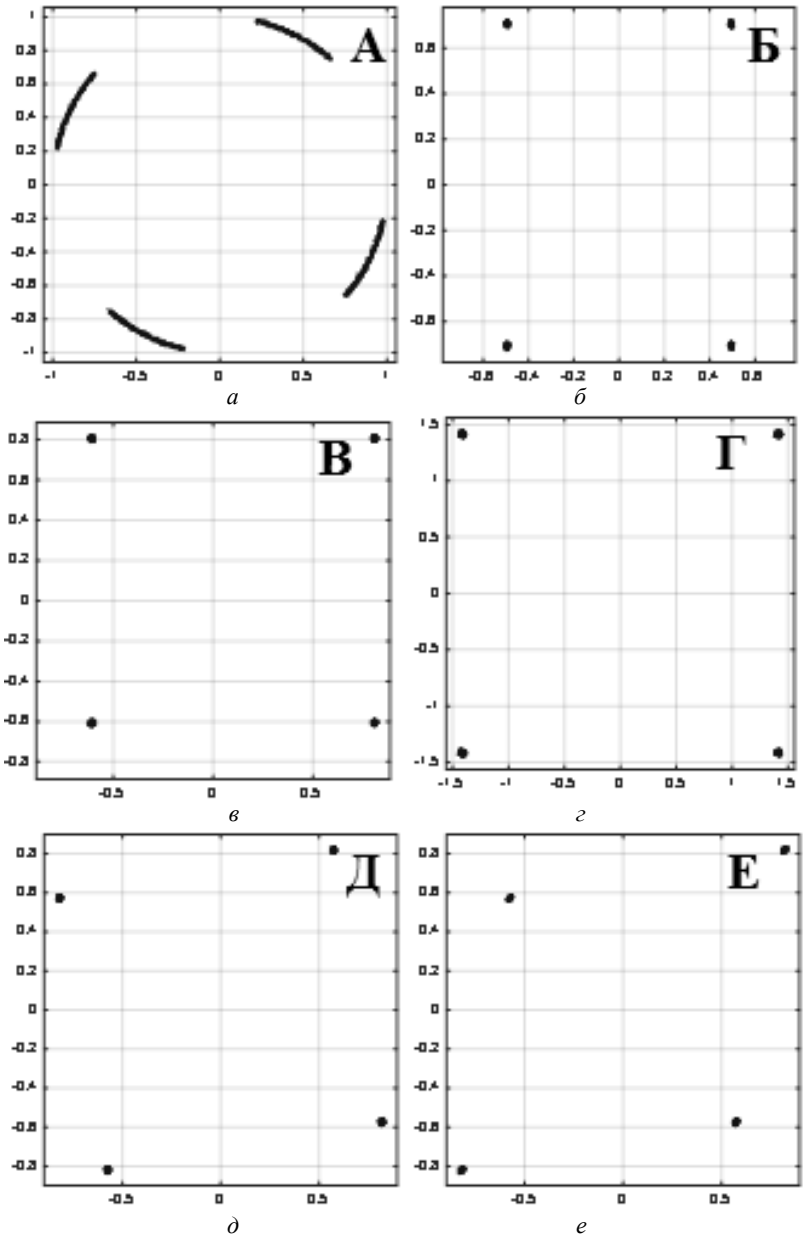


Рис. 1. Созвездия сигналов с различными видами искажений

$$\mathrm{MER} = 10\lg\frac{\sum_{k=1}^{N}(I_k^2 + Q_k^2)}{\sum_{k=1}^{N} e_k^2}, \qquad (1)$$

где I_k и Q_k – это синфазная и квадратурная координаты принятого символа созвездия; $e_k^2 = (I_k - I_{\tilde{k}})^2 + (Q_k - Q_{\tilde{k}})^2$ – квадрат модуля вектора ошибки; EVM – относительная ошибка модуляции (Error Vector Magnitude).

$$\mathrm{EVM} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N} e_k^2}{\sum_{k=1}^{N}(I_k^2 + Q_k^2)}} \cdot 100\%. \qquad (2)$$

Также стоит отметить, что все рассмотренные программы дополнительно выводят следующие данные:

– сигнальное созвездие;

– графики компонент сигнала (синфазной и квадратурной);

– глазковые диаграммы;

– спектр сигнала;

– массив демодулированных символов.

На основе рассмотренного материала можно сделать выводы, что в большинстве случаев оцениваются следующие параметры:

– смещение частоты несущего сигнала;

– рассогласование амплитуд между *I*- и *Q*-компонентами сигнала;

– смещение центра созвездия, отсчитываемое от начала координат;

– ошибка амплитуды, усреднённая по всем символам в одном интервале;

– усреднённая ошибка фазы для всех символов на интервале анализа;

– нарушение ортогональности компонент сигнала, в градусах;

– отношение сигнал/шум;

– среднее значение относительной ошибки модуляции в заданном интервале, в процентах.

Популярность измерения данных видов искажений можно объяснить следующим: чаще всего рассматриваются сигналы с PSK- и QAM-модуляциями, где информация заложена в фазе и амплитуде, соответственно, изменение этих параметров может исказить переносимую сигналом информацию, поэтому необходимо отслеживать данные изменения и, по возможности, компенсировать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программа векторного анализа сигналов 89600 VSA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.keysight.com/ru/ru/software/application-sw/89600-vsa-software.html, свободный (дата обращения: 05.02.2020).

2. 89600 VSA Supported Hardware Platforms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.keysight.com/main/editorial.jspx?cc=RU&lc=rus&ckey=1988121&nid=-32806.0.02&id=1988121, свободный (дата обращения: 15.02.2020).

3. SignalVu-PC Vector Signal Analysis Software – V3.23.0022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.tek.com/model/rsa306-software/signalvu-pc-vector-signal-analysis-software-v3230022, свободный (дата обращения: 17.02.2020).

4. Spike Spectrum Analyzer Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://signalhound.com/spike, свободный (дата обращения: 20.02.2020).

5. A6/Micro-Rx Vector Signal Analyzer Operation Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.transcomwireless.com/wp-content/uploads/2019/04/Transcom-A6-Vector-Signal-Analyzer-Manual_v1.2.pdf, свободный (дата обращения: 25.02.2020).

УДК 621.391.7:383.523

MATLAB-SIMULINK-МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ПО ПРОТОКОЛУ BB84

С.И. Разгуляев, В.Е. Филатова, студенты каф. РСС

Научный руководитель А.С. Задорин, проф. каф. РСС, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, Sergeant_96@mail.ru , valeriyafilatova43625372@gmail.com

Отмечаются возможности каналов оптической связи для построения систем квантового распределения ключей (СКРК). Предложена программная Matlab-Simulink-модель такой системы на основе однокубитового протокола BB84, включающая расчет помехоустойчивости фотоприемного устройства (ФПУ).

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, протокол BB84.

Ключевой проблемой создания защищенного канала связи на основе криптографических протоколов является безусловная защищенности систем распределения криптографических ключей между удаленными пользователями [1]. Наиболее совершенными здесь являются системы квантового распределения ключей (СКРК) [2] (рис. 1).

Целью данного сообщения является разработка и исследование программной Matlab-Simulink-модели системы квантового распределения ключа при помощи поляризационного кодирования.

Основной принцип работы системы основывается на случайной смене состояний кубитов последовательности m_A, которая формируется на стороне ПА. При этом положение базиса в разных тактовых интервалах m_A оказываются развернутыми по отношению друг к другу на угол φ = 45°, при этом угол фиксирован [1–3].

$$|\psi_2\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle . \quad (1)$$

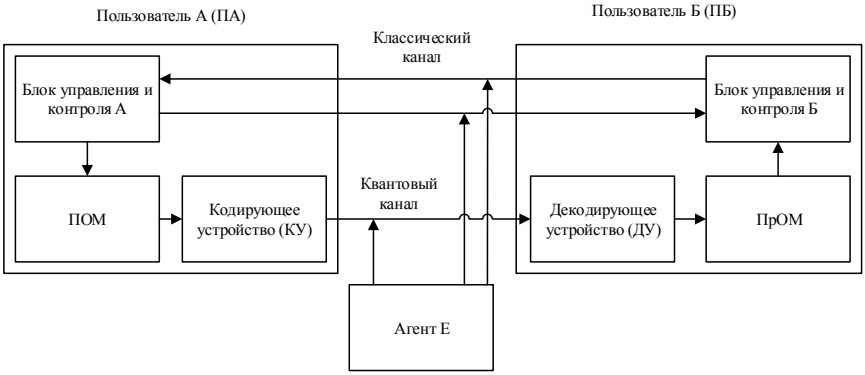


Рис. 1. Структурная схема системы квантового распределения ключа

Такая система направлена на выполнение стороной ПБ проекционных измерений кубитов (1) в соответствии с графом, представленным на рис. 2. Отсюда следует, что, приготавливая кубиты в любом базисе, один из коэффициентов α, β в (1), в зависимости от передаваемого символа (0 или 1), всегда принимает значение ноль.

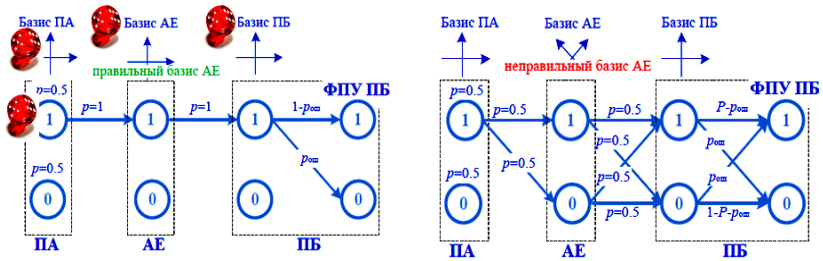


Рис. 2. Граф измерений поляризационных кубитов в СКРК BB84

При проведении проекционных измерений, последовательности m_A, которая поступает из квантового канала, стороной ПБ формируется другая случайная последовательность $m_Б$. Поскольку m_A и $m_Б$ некоррелированы, то среднее число совпадений вычислительного и измерительного базисов допустимо для половины элементов, из которых создается ключевая последовательность $k_{АБ}$. В противоположном случае оба коэффициента α и β измеряемого кубита m_{Ai} не равны нулю, следовательно, безошибочное копирование кубитов в этих условиях невозможно. Этот вывод согласуется с теоремой о запрете клонирования, которая, в свою очередь, ограничивает результаты успешной атаки нелегитимного пользователя *E* на канал связи [3]. Поэтому,

перспективы эффективного копирования ключевой последовательности m_K пользователем E связаны лишь с тем, что программно-аппаратное обеспечение СКРК несовершенно. Одним из основных показателей такого рода обычно является уровень ошибок, теоретический предел которых не должен превышать 11% [2].

Программная модель СКРК по протоколу BB84 разработана нами в среде Matlab–Simulink. Ее структурная схема показана на рис. 3.

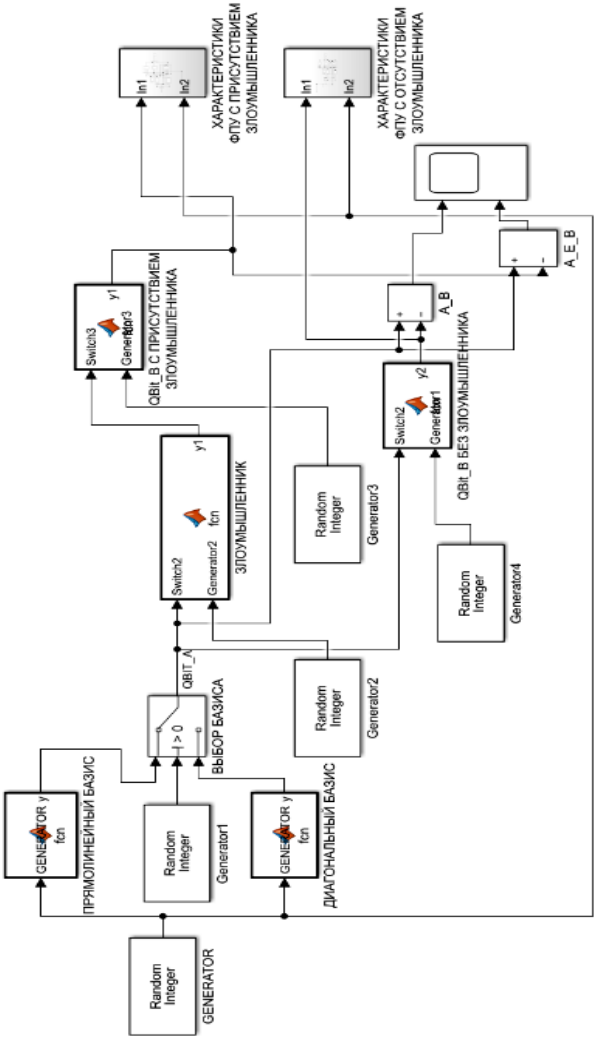


Рис. 3. Модель СКРК по протоколу BB84

На этой схеме блоки «Прямой базис» и «Наклонный базис» предназначены для формирования кубита на стороне *А*. Блок «Выбор базиса» случайным образом выбирает между прямым и наклонным базисами. Блок «Злоумышленник» реализует работу нелегитимного пользователя. Блок «Qbit_B с присутствием злоумышленника» реализует работу стороны *Б* с врезанным нелегитимным пользователем, а блок «Qbit_B без злоумышленника» показывает работу, когда нелегитимный пользователь отсутствует (см. рис. 3).

Блок «*d* – четкость измерений» показывает четкость измерений, при $d = 0$ измерение нечеткое на стороне *А*, а блок «*D* – правильность измерений» показывает результат того, было ли измерение на стороне *Б* правильным. Блоки «Характеристики ФПУ с отсутствием злоумышленника» и «Характеристики ФПУ с присутствием злоумышленника» включают расчет ошибок при пропуске кубита, расчет ошибок при регистрации кубитов, расчет коэффициента квантовых ошибок.

Таким образом, была разработана и исследована программная Matlab-Simulink-модель СКРК по протоколу BB84.

Данная программная Matlab-Simulink-модель СКРК-BB84 планируется к внедрению в учебный процесс в качестве основы одной из лабораторных работ по теме «Квантовые вычисления» курса «Системы и устройства микроволновой радиофотоники».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. Квантовая криптография: учеб.-метод. пособие. – М.: Макс-Пресс, 2011. – 112 с.

2. Имре Ш., Балаж Ф. Квантовые вычисления и связь. Инженерный подход. – М.: Физматлит, 2008. – 320 с.

3. Bennett C.H. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states // Phys. Rev. Lett. – 1992. – Vol. 68. – P. 3121.

УДК 621.391.7:383.523

MATLAB-SIMULINK-МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ПО ПРОТОКОЛУ B92

С.И. Разгуляев, В.Е. Филатова, А.О. Кирнос, студенты каф. РСС

Научный руководитель А.С. Задорин, проф. каф. РСС, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, Sergeant_96@mail.ru, valeriyafilatova43625372@gmail.com, alina_kirnos@mail.ru.

Отмечаются возможности каналов оптической связи для построения систем квантового распределения ключей (СКРК). Предложена программная Matlab-Simulink-модель такой системы на основе од-

нокубитового протокола B92, включающая расчет помехоустойчивости фотоприемного устройства (ФПУ).

Ключевые слова: квантовое распределение ключей, протокол B92, помехоустойчивость СКРК.

Одной из главных проблем создания защищенного канала связи на основе криптографических протоколов является проблема безусловной защищенности систем распределения криптографических ключей между удаленными пользователями [1]. Наиболее совершенными здесь являются системы квантового распределения ключей (СКРК) [2].

Целью настоящего сообщения является разработка и исследование программной модели СКРК по протоколу B92.

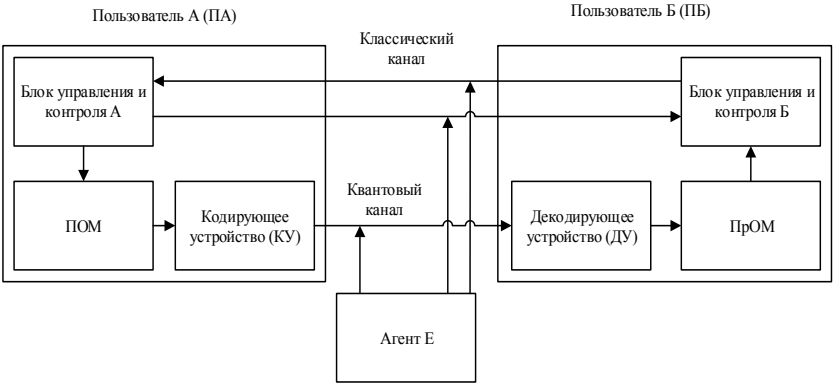


Рис. 1. Структурная схема системы КРК

Принцип работы системы поясняется структурной схемой рис. 1 и графом на рис. 2 процедуры формирования ключа по протоколу КРК B92.

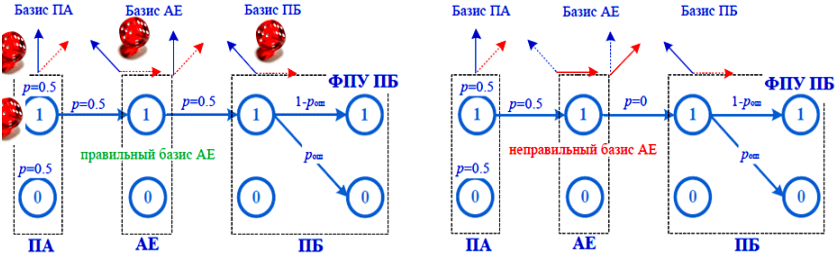


Рис. 2. Граф формирования ключа по протоколу КРК B92 в условиях приема символа 1 и присутствия АЕ

Здесь для кодирования состояния фотона на передающей стороне используется один базис с двумя неортогональными состояниями – «0» соответствует поляризация 0°, «1» – 45°. Измерение при этом происходит в двух базисах: в прямом, где «0» – 0°, «1» – 90°, и диагональном, где «0» – 45°, а «1» – 135° [1–5].

В том случае, когда ПБ получает в результате измерения «1», это указывает на то, что он не угадал переданное ПА состояние и соответствующие биты в последовательностях $m_А$ и $m_Б$ не совпадают. По классическому каналу пользователь Б сообщает номера битов, где получил «1», пользователю А. После инвертирования одним из пользователей ключевой последовательности на сторонах ПА и ПБ получаются полностью совпадающие ключи $k_{АБ}$.

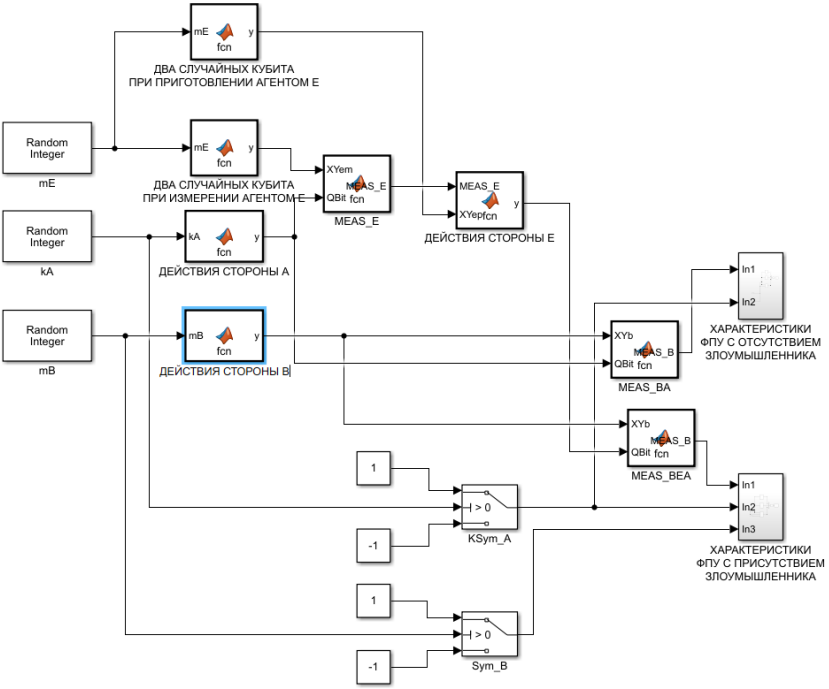


Рис. 3. Блок-схема модели СКРК по протоколу B92

Отсюда следует, что перспективы успешного копирования ключевой последовательности $m_К$ агентом E могут быть связаны лишь с несовершенством программно-аппаратного устройства системы КРК ПА и ПБ. К основным системным показателям такого рода обычно относят уровень ошибок, теоретический предел которых не должен превышать 11% [1, 2].

Разработанная нами программная модель СКРК была реализована с помощью средств ПО Matlab–Simulink по схеме поляризационного кодирования кубитов согласно протоколу B92. Ее блок-схема показана на рис. 3.

В ее состав включены блоки «Действия стороны А», «Действия стороны В» и «Действия стороны Е», предназначенные для формирования кубита пользователями. Блоки «MEAS» показывают измерение кубита пользователями (см. рис. 3). Блок «Расчет ошибок при пропуске кубита» показывает в процентах, сколько кубит было пропущено приемником, блок «Расчет ошибок при регистрации кубитов» показывает в процентах, сколько кубит было принято ошибочно приемником из иных источников. Блок-схема модуля расчета коэффициента квантовых ошибок показана на рис. 4.

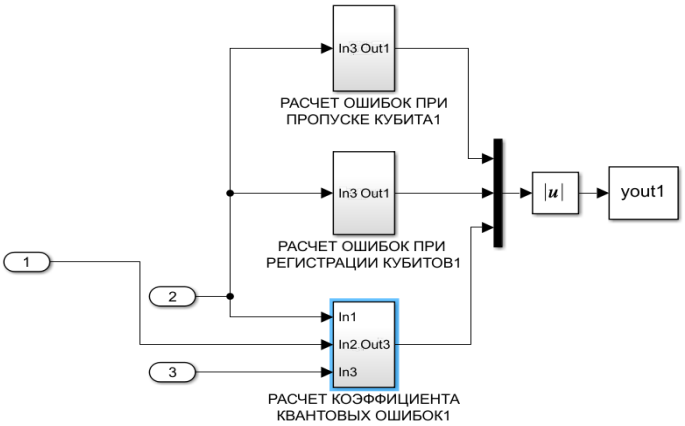


Рис. 4. Блок-схема «Расчет коэффициента квантовых ошибок»

Описанная выше программная Matlab-Simulink-модель СКРК по протоколу B92 планируется к внедрению в учебный процесс в качестве основы одной из лабораторных работ по теме «Квантовые вычисления» курса «Системы и устройства микроволновой радиофотоники».

ЛИТЕРАТУРА

1. Кронберг Д.А., Ожигов Ю.И., Чернявский А.Ю. Квантовая криптография: учеб.-метод. пособие. . – М.: Макс-Пресс, 2011. – 112 с.

2. Имре Ш., Балаж Ф. Квантовые вычисления и связь. Инженерный подход. – М.: Физматлит, 2008. – 320 с.

3. Bennett C.H. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states // Phys. Rev. Lett. – 1992. – Vol. 68. – P. 3121.

4. Leeson D.B. A simple model of the feedback oscillator noise spectrum // Proceedings of the IEEE. – 1966. – Vol. 54, No 2. – P. 329–330.

5. Yao X.S. Optoelectronic oscillator for photonic systems // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1996. – Vol. 32, No. 7. – P. 1141–1149.

УДК 621.375.026

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ X-ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

А.В. Местников, студент каф. ТОР

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

г. Томск, ТУСУР, traveller7296@gmail.com

Приведены результаты моделирования характеристик сверхвысокочастотного (СВЧ) усилителя мощности (УМ) диапазона 2,7–3,1 ГГц (S-диапазон) с использованием нелинейной модели на основе X-параметров, а также, сравнение полученных характеристик (выходная мощность, S-параметры) с характеристиками, полученными при использовании нелинейной модели транзистора Qorvo QPD1008, с целью изучения возможностей применения X-параметров при разработке СВЧ УМ.

Ключевые слова: Усилитель мощности, нелинейная модель, X-параметры, выходная мощность, S-параметры.

X-параметры позволяют описать спектр падающих и отраженных волн на том или ином порту устройства при разных входных воздействиях и величинах нагрузки с учетом нелинейных эффектов устройства [1, 2]. X-параметры, полученные с транзистора, полностью опишут его поведение при разных входных воздействиях, помимо этого, использование X-параметров позволяет линеаризовать вычисления, выполняемые методом гармонического баланса. Они могут быть получены с помощью нелинейного векторного анализатора цепей (NVNA) PNA-X производства Keysight или же могут быть рассчитаны в системе автоматизированного проектирования (САПР) Keysight Advanced Design System (ADS).

Результаты работы. В рамках научно-исследовательской работы в САПР ADS были получены X-параметры транзистора Qorvo QPD 1008 в случае оптимальных импедансов источника и нагрузки (диапазон входных мощностей от 20 до 40 дБм, частотный диапазон от 2 до 5 ГГц), схема получения X-параметров приведена на рис. 1. Полученные X-параметры транзистора (X-модель) были использованы в модели СВЧ УМ вместо нелинейной модели. Структурная схема данного

усилителя приведена на рис. 2. Получение X-параметров с нелинейной модели транзистора обусловлено тем, что доступа к NVNA PNA-X нет.

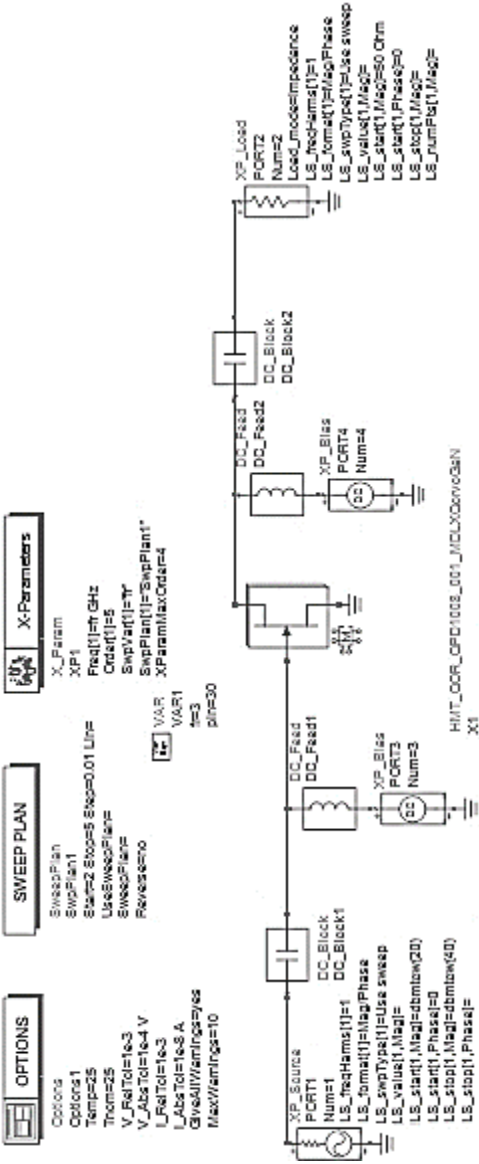


Рис. 1. Схема получения X-параметров транзистора Qorvo QPD1008

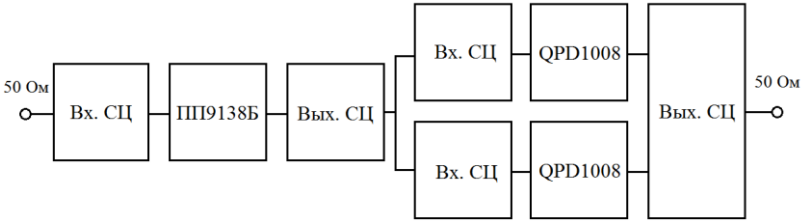


Рис. 2. Структурная схема СВЧ УМ

Выходная мощность СВЧ-усилителя приведена на рис. 3, S-параметры приведены на рис. 4. Время, затраченное на моделирование, приведено на рис. 5.

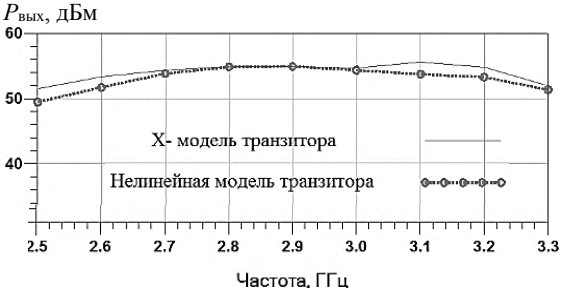


Рис. 3. Результаты моделирования выходной мощности

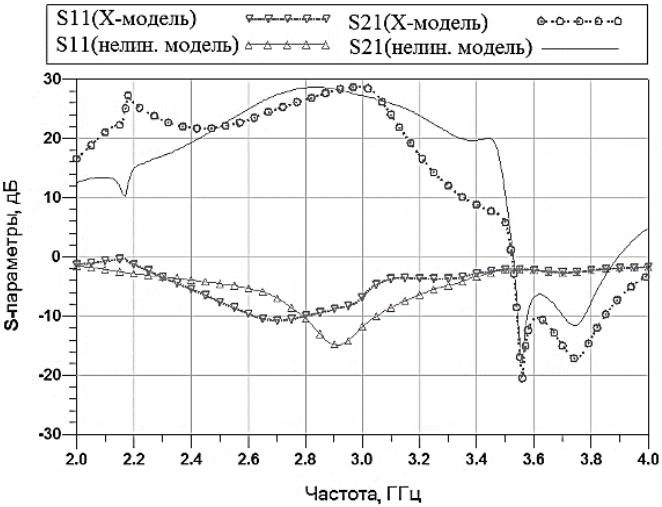


Рис. 4. S-параметры усилителя

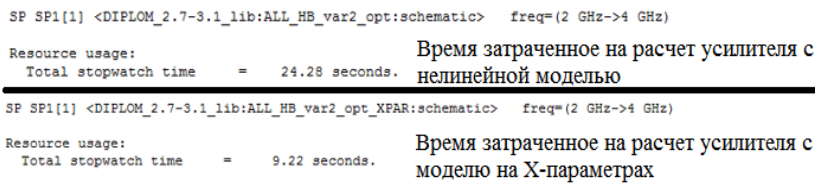


Рис. 5. Время, затраченное на расчеты

По результатам моделирования видно, что расхождения по выходной мощности минимальны, что позволяет использовать модель основе X-параметров транзистора вместо нелинейной модели с целью увеличения скорости моделирования. Расхождения вызваны тем, что нагрузки в реальной схеме являются частотно-зависимыми, а X-параметры были получены только для случая оптимальных импедансов источника и нагрузки. Для увеличения точности X-модели необходимо получать X-параметры непосредственно с транзистора с учетом поведения импедансов источника и нагрузки в зависимости от частоты с помощью NVNA PNA-X.

ЛИТЕРАТУРА

1. X-Parameters. Characterization, Modeling, and Design of Nonlinear RF and Microwave Components, David E. Root, Jan Verspecht, Jason Horn, Mihai Marcu, The Cambridge RF and Microwave engineering series.

2. Николаев Е. X-параметры – эффективный инструмент для анализа электрических цепей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3138_125.pdf (дата обращения: 26.02.2020).

УДК 53.087

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА)

А.Б. Петров, студент каф. КУДР

Научный руководитель А.А. Бомбизов, нач. СКБ «Смена», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, petrov_a_b97@mail.ru

Выполнялась оценка конструкций чувствительных элементов индукционного датчика с учетом достижения максимальной чувствительности электромагнитного излучения от летательного аппарата и уменьшения отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, собственное электромагнитное излучение, индукционный датчик, чувствительный элемент, спектральный анализ.

На сегодняшний день рынок производства беспилотных летательных аппаратов стремительно растет. Малогабаритные беспилотные аппараты применяют для аэрофотосъемки, геодезических взысканий, мониторинга объектов и т.д. В военных же целях БПЛА используются: для разведки, ведения радиоэлектронной борьбы, служат ретранслятором радиосигналов, выполняют роль целеуказателя для наведения артиллерийских снарядов, могут быть начинены взрывающимся веществом. В руках злоумышленников БПЛА представляет весьма серьезную проблему для жизни людей и стратегических важных объектов.

Большинство производимых БПЛА осуществляют работу, используя бесколлекторные электродвигатели. Электродвигатель посредством своей работы выделяет электромагнитное излучение, обнаружить которое целесообразней индукционным датчиком. Первое исследование по возможности обнаружения БПЛА по признакам электромагнитного излучения описано в работе [1]. В статье [2] исследовался подход обнаружения БПЛА по признакам их собственного электромагнитного излучения, определена связь параметров и режимов работы двигателей БПЛА и зарегистрированными спектральными составляющими. В [2] был использован чувствительный элемент с цилиндрическим каркасом. В [3] были смоделированы входной аналоговый тракт и конструкция индукционного датчика. В работе [4] проведена оценка чувствительности индукционного датчика со ступенчатой формой чувствительного элемента.

Целью экспериментальных исследований в данной работе является сравнение трех конструкций чувствительных элементов индукционного датчика для задачи обнаружения БПЛА. Анализ электромагнитного излучения (ЭМИ) БПЛА выполнялся в полосе частот от 4 до 10 кГц, полезное электромагнитное излучение электродвигателей Walkera runner 250 advance находится в диапазоне от 6 до 9 кГц.

На рис. 1 продемонстрированы конструкции чувствительных элементов индукционного датчика: *а* – цилиндрическая форма на 1000 витков с неравномерной медной намоткой; *б* – цилиндрическая укороченная форма на 1715 витков в 6 слоев с равномерной медной намоткой; *в* – ступенчатая форма на 1715 витков.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки.

В ходе проведения исследований было выявлено, что промышленная частота 50 Гц вносит электромагнитные помехи на входной тракт усилительного каскада, это обусловлено работой люминесцентных ламп, электронно-вычислительных машин и т.д. Ранее было определено, что для уменьшения влияния помех эксперименты нужно

проводить за чертой города, но ввиду погодных условий исследование проводилось в лаборатории с выключенным светом в выходной день.

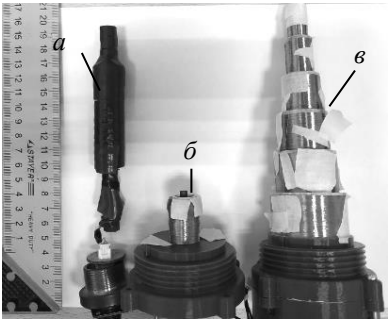


Рис. 1. Конструкции чувствительных элементов индукционного датчика

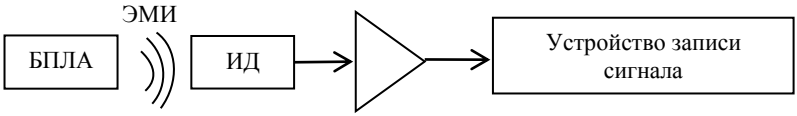


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: ЭМИ – электромагнитное излучение; ИД – индукционный датчик с разными чувствительными элементами; ИУ – инструментальный усилитель

На рис. 3 представлена зарегистрированная спектрограмма электромагнитного излучения БПЛА с использованием трех форм чувствительных элементов: *а* – цилиндрическая; *б* – ступенчатая; *в* – цилиндрическая укороченная. Объект исследования находился на близком расстоянии от индукционного датчика для более точного сравнительного анализа. Пунктиром обозначена спектральная область с наибольшей концентрацией спектральных составляющих, присущих БПЛА.

Вывод. У ступенчатого чувствительного элемента увеличенные диаметры катушек по сравнению с сердечником и разрывы в каркасе на практике вносят потери, уменьшая результирующую чувствительность. У укороченного цилиндрического датчика низкая чувствительность, но отношение сигнал/шум выше, чем у остальных датчиков. Возможно, это связано с самоэкранированием встречно направленными верхними слоями обмотки. Цилиндрический и ступенчатый чувствительный элемент по чувствительности сравнимы между собой. Оценка спектра показала, что соотношение сигнал/шум у укороченного чувствительного элемента больше и составляет порядка 25 дБ.

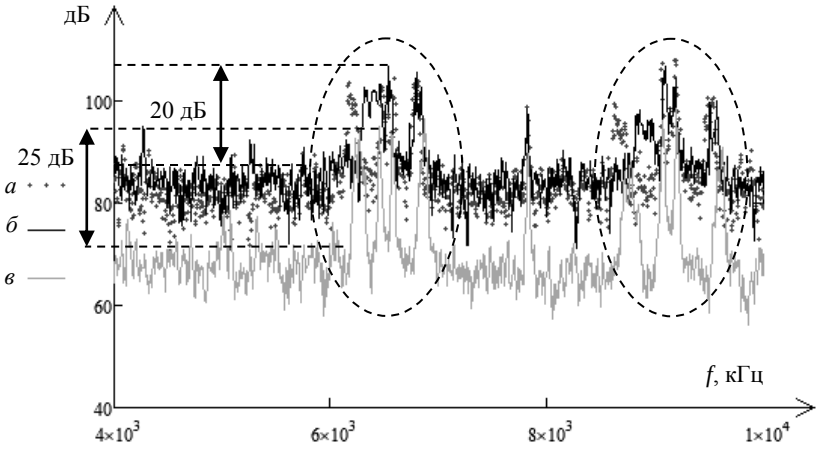


Рис. 3. Исследование ЭМИ от БПЛА

В дальнейшем планируется оценить дальность обнаружения БПЛА за чертой города с использованием цилиндрического укороченного чувствительного элемента индукционного датчика, а также сконструировать еще один такой же датчик и провести исследования, используя дифференциальный режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bombizov A. An experimental detection of eletromagnetic radiation generated by unmanned aerial vehicles / A. Bombizov, S. Artishchev, A. Loschilov, N. Malyutin // AIP Conference Proceedings 1899, 060021 (2017). – URL: https://doi.org/10.1063/1.5009892

2. Бомбизов А.А. Исследование электромагнитного и акустического излучения беспилотных летательных аппаратов в области низких частот / А.А. Бомбизов, А.Б. Петров, А.Г. Лощилов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, No. 1. – С. 57–61.

3. Петров А.Б., Захаров Р.А. Разработка датчика первичной регистрации для задачи обнаружения беспилотного летательного аппарата // Матер. докл. VII рег. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 октября – 30 ноября 2018 г. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – С. 391–395.

4. Петров А.Б. Оценка конструкции ступенчатого индукционного датчика для задачи обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по признакам собственного электромагнитного излучения // Матер. докл. VII рег. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 октября – 30 ноября 2018 г. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2018. – С. 499–503.

УДК 621.375.026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМЫ ДОГЕРТИ И УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ В РЕЖИМЕ КЛАССА АВ

Р.Е. Зейнелгаби, магистрант каф. ТОР

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

г. Томск, ТУСУР, zeinelgabi.rakhim@mail.ru

Для обеспечения высокого КПД и низких значений интермодуляционных искажений для систем сотовой связи WiMAX был разработан СВЧ-усилитель мощности по схеме Догерти. Проведен сравнительный анализ КПД, выходной мощности и интермодуляционных искажений схемы Догерти и усилителя мощности в режиме класса АВ.

Ключевые слова: усилитель мощности (УМ), коэффициент полезного действия (КПД), схема Догерти, нелинейные искажения, САПР, моделирование.

Для обеспечения работы базовой станции с минимальным количеством ошибок УМ должен иметь высокую пиковую (максимальную) мощность, которая на 10 дБ превышает среднюю, т.е. не менее 50 дБмВт (100 Вт). Кроме того, на УМ накладывают жесткие требования к уровню нелинейных искажений [1]. Самым компромиссным требованием является условие, что наряду с высокой линейностью, УМ должен обладать высоким коэффициентом полезного действия (КПД) порядка 30% при средней выходной мощности.

Усилитель по схеме Догерти, сочетающий работу квазилинейного режима АВ и нелинейного класса С, может обеспечить необходимые требования по линейности и КПД [2]. Расчет усилителя по схеме Догерти производился с использованием транзистора CGHV 27100F мощностью 100 Вт и питающим напряжением 50 В на частоте 2,5 ГГц. Для схемы АВ напряжение смещения, подаваемое на затвор, – 2,605 В, а для режима С – 3,5 В, что дает достаточно неплохое нулевое приближение для проведения численных расчетов. Поскольку работа схемы Догерти связана с существенно нелинейными режимами работы транзисторов, то ее расчет возможен только численными методами на основе метода гармонического баланса. Для определения нагрузок применялись идеальные трансформаторы (тюнеры), схема с использованием тюнеров изображена на рис. 1.

Следует отметить, что при разделении входного сигнала на основной и вспомогательный усилители используют синфазный делитель или квадратурный мост. Преимуществом применения квадратурного моста является отсутствие дополнительной четвертьволновой линии, а также возможность получения хорошего согласования по входу, поэтому был выбран вариант построения с квадратурным мостом.

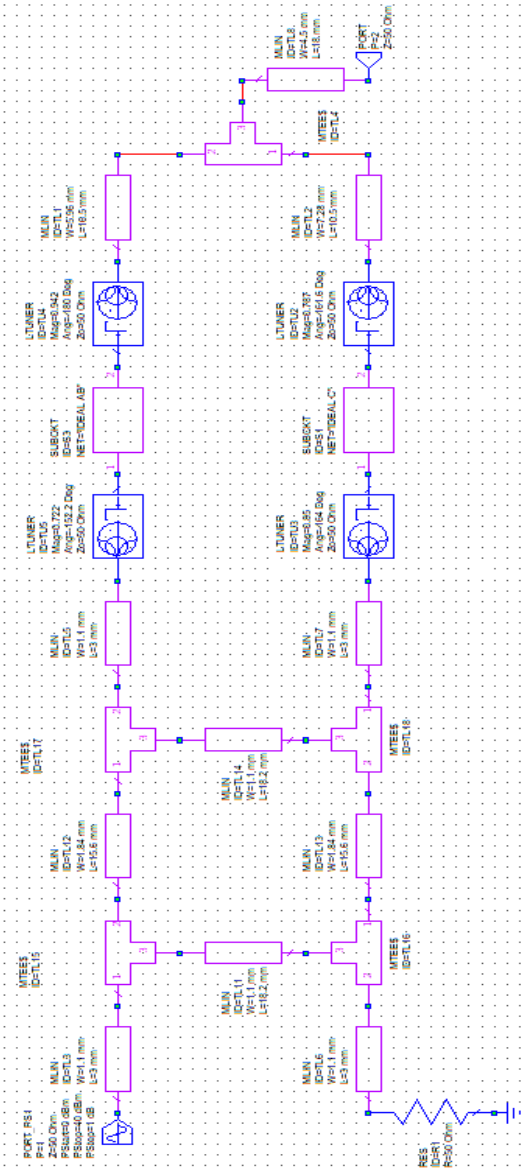


Рис. 1. Функциональная схема усилителя Догерти

На рис 2. представлены параметры выходной мощности и КПД для схемы Догерти и УМ класса АВ. Как видно из рис. 2, КПД схемы

Догерти при выходной мощности 200 Вт равна 51%, что на 12% больше, чем у УМ класса АВ.

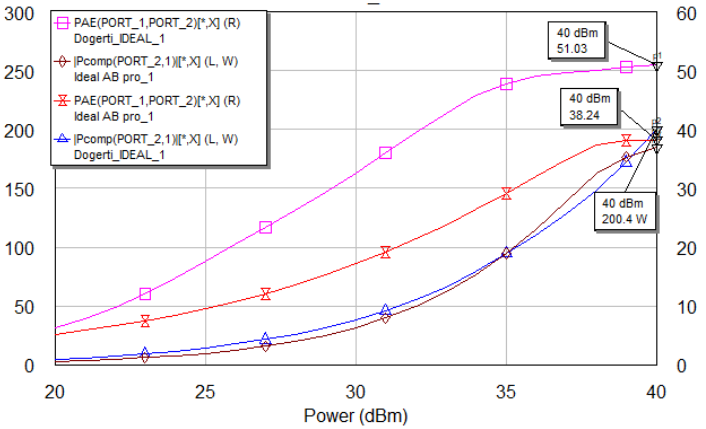


Рис. 2. Зависимость выходной мощности (P_{comp}) и КПД (PAE) усилителя Догерти и УМ класса АВ

На рис. 3 произведена оценка интермодуляционных искажений разработанных усилителей при двухчастотном входном сигнале. При этом основным критерием считаются интермодуляционные искажения третьего порядка, определяемые на частотах $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ при подаче двух одинаковых по амплитуде сигналов с частотой f_1 и f_2.

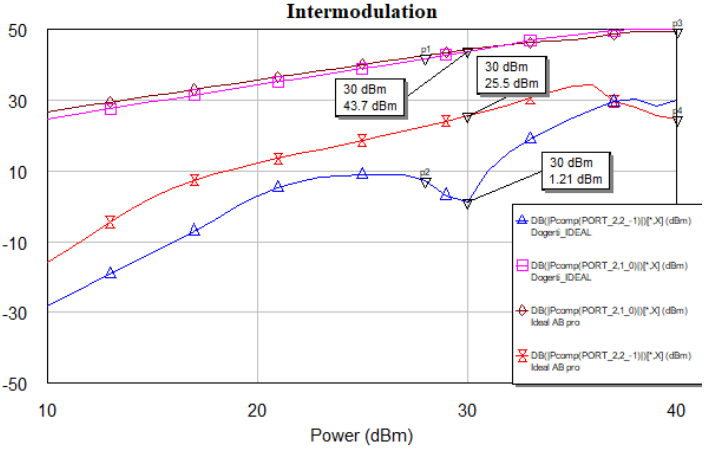


Рис. 3. Зависимость основной частоты и комбинационной составляющей третьего порядка для усилителя класса АВ и схемы Догерти на частоте 2,5 ГГц (Δf = 10 МГц)

Из рис. 3 видно, что мощности на основной частоте практически совпадают, а уровень интермодуляционных искажений для модели на основе суммарного транзистора при выходной мощности 43,7 дБмВт на 22,2 дБ меньше.

При анализе полученных данных можно отметить, что построение выходных каскадов в режиме одиночного каскада АВ не позволяет обеспечить оптимальные значения по КПД и нелинейным искажениям, хотя удовлетворяет величине максимальной пиковой мощности (более 100 Вт). Усилитель по схеме Догерти в качестве выходного каскада имеет лучшие характеристики по КПД (51%) и нелинейным искажениям, что позволяет в системах связи добиться хорошей пропускной способности и снизить эксплуатационные затраты передатчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colantonio P., Giannini F. High Effeciency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers // Microwave Journal: WILEY [Электронный ресурс]. Электрон. журн. – 2009. – URL: https://leseprobe.buch.de/images-adb/f2/fd/f2fda875-1532-4b96-81ee-93176f16a2c9.pdf (дата обращения: 10.11.2019).

2. Marcos A.Z. Efficiency Enhancement of Linear GaN RF power Amplifiers Using the Doherty Technique // Microwave Journal: Kassel university press [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – 2009. – URL: http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-622-0.volltext.frei.pdf (дата обращения: 14.12.2019).

УДК 621.375.026

СВЧ-УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ L-ДИАПАЗОНА

А.Н. Глазырин, Р.Е. Зейнелгаби, студенты каф. ТОР

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

г. Томск, ТУСУР, glazirin.saniaD@yandex.ru

Приведены результаты моделирования СВЧ-усилителя мощности класса F на основе нелинейной модели транзистора CGH60008D для повышения коэффициента полезного действия.

Ключевые слова: СВЧ, усилитель мощности, нелинейная модель, выходная мощность, КПД, класс F, L-диапазон.

Результаты работы. Развитие схемотехники происходит в двух основных направлениях: повышение рабочей частоты и повышение коэффициента полезного действия в освоенных диапазонах. В класс F УМ используется гармоническое разделение токов и напряжений. Нагрузка УМ состоит из резонансных контуров, настроенных на про-

пускание и подавление гармоник. В УМ класса F теоретическое КПД может достигать 100% [1, 3, 4].

В рамках НИР было проведено моделирование СВЧ-усилителя мощности класса F в AWRDE 10 с целью повышения коэффициента полезного действия. В качестве нелинейной модели транзистора была использована модель полевого транзистора CGH60008D от производителя Cree [2]. На рис. 1 приведена структурная схема усилителя мощности. Входная мощность УМ составляет 25,7 дБм (0,37 Вт). Напряжение смещения на затворе транзистора было выбрано –4,5 В, что соответствует углу отсечки, равному $\theta = 90°$. Напряжение питания 28 В.

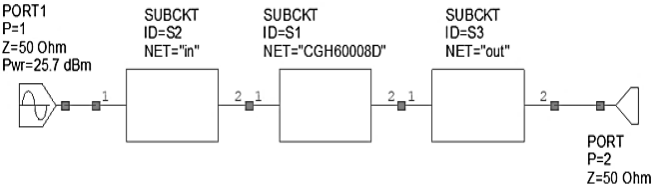


Рис. 1. Структурная схема СВЧ-усилителя мощности класса F

Выходная согласующая цепь спроектирована таким образом, чтобы $Z(f_0) = R$; $Z(2f_0) = 0$; $Z(3f_0) = \infty$; $Z(4f_0) = 0$; $Z(5f_0) = \infty$ [4]. В результате получились следующие импедансы: $Zn(f_0) = 35{,}81+i44{,}92$; $Zn(2f_0) = 17{,}96+i205{,}32$; $Zn(3f_0) = 2{,}282–i35{,}93$; $Zn(4f_0) = 26{,}53+i127{,}5$; $Zn(5f_0) = 26{,}67–i14{,}67$.

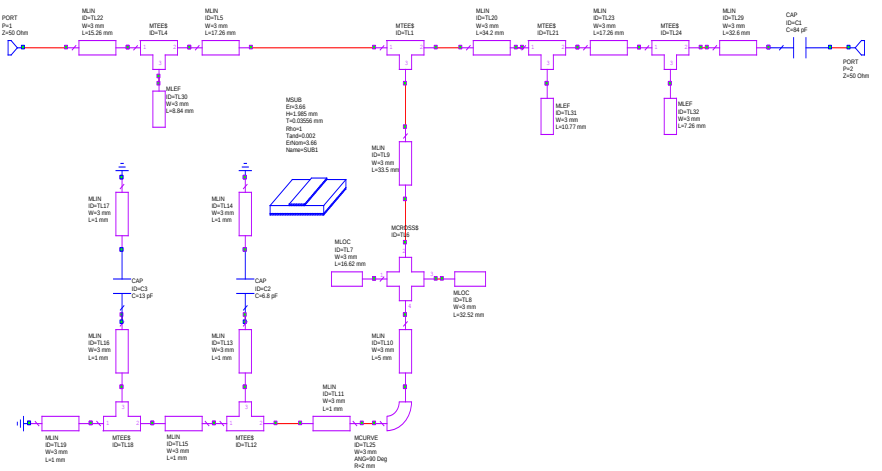


Рис. 2. Выходная согласующая цепь

В результате выходная мощность составила 39,96 дБм, что соответствует 8,63 Вт (рис. 3). КПД данного усилителя на рабочей частоте составил 77,1%.

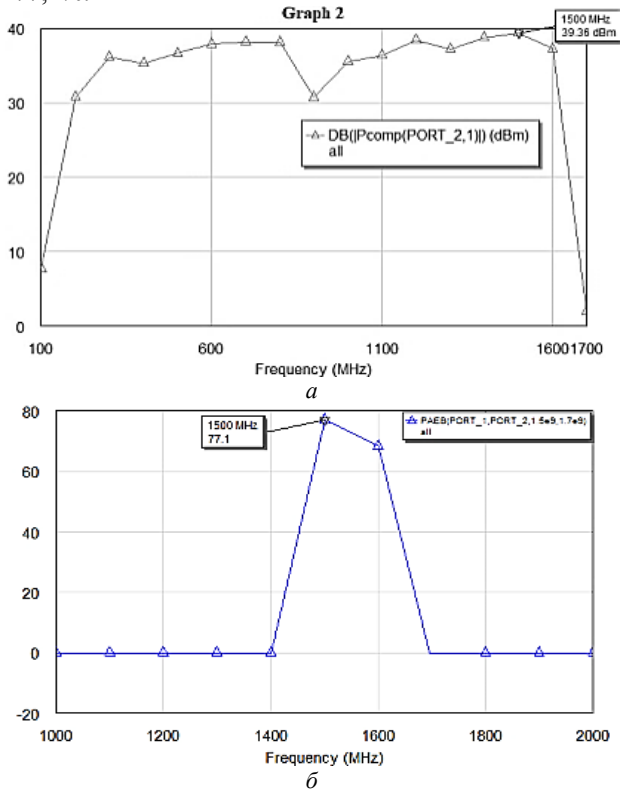


Рис. 3. Выходная мощность (*а*) и КПД (*б*)

Из данной зависимости видно, что при входной мощности 29 дБм (0,8Вт) будет максимальный КПД, который составит 79,1%. Для того чтобы усилитель мощности соответствовал классу F, необходимо на вход подавать мощность в пределах от 24,8 до 31,9 дБм.

Временная форма тока определяется несущей частотой и её чётными гармониками, временная форма стокового напряжения – несущей и её нечётными гармониками (рис. 5) [1–3].

На рис. 6 приведена топология УМ класса F. Размеры УМ: длина 169 мм, ширина 78 мм.

Как было сказано, КПД смоделированного усилителя мощности класса F больше 75%, что соответствует теории.

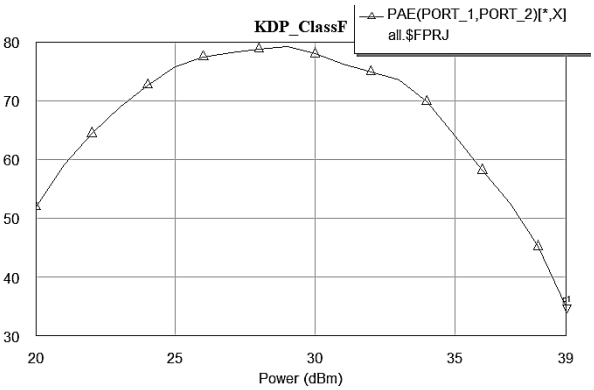
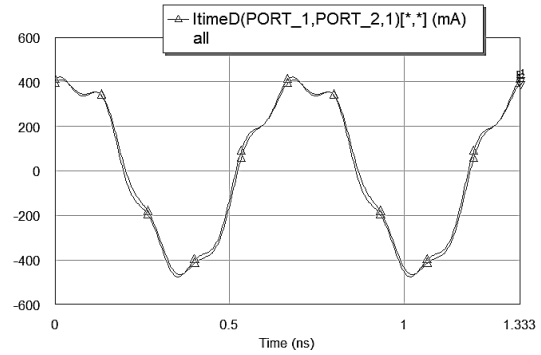
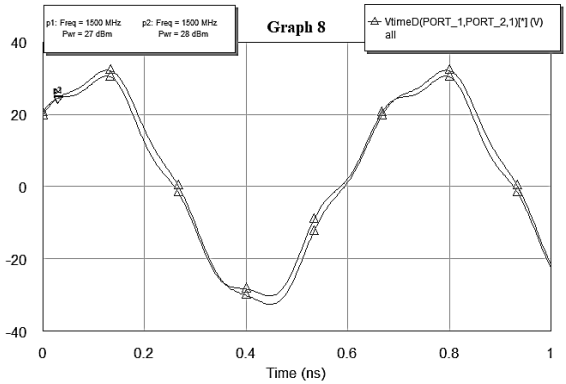


Рис. 4. Зависимость КПД при входной мощности



а



б

Рис. 5. Временные формы напряжения (*б*)
и тока (*а*), полученные в результате моделирования

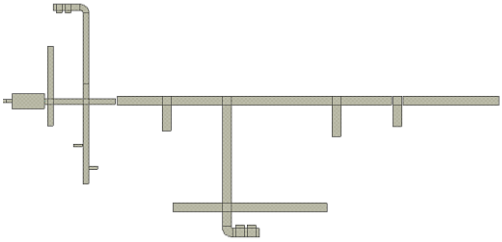


Рис. 6. Топология УМ

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиопередающие устройства: учеб. для вузов / под ред. В.В. Шахгильдяна. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2003.

2. CGH60008D datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/799181/CREE/CGH60008D.html (дата обращения: 20.09.2019).

3. Paolo C., Franco G., Ernesto L. High Efficiency RF and Microwave Solid State Power Amplifiers. – 2009.

4. Raab F.H. Maximum Efficiency and Output of Class-F Power Amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. – 2001. – Vol. 49, № 6. – P. 1162–1166.

УДК 621.382.2/.3

РАЗРАБОТКА GAN АТТЕНЮАТОРА И ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ В МОНОЛИТНОМ ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

А.М. Досанов, инж.; А.В. Кондратенко, вед. инж.;
Д.С. Брагин, директор ЦСП ТУСУР;
Д.Д. Зыков, руководитель проекта АО «ПКК Миландр»
г. Томск, bds@csp.tusur.ru

Представлены результаты проектирования функциональных узлов широкополосного 5-разрядного аттенюатора (диапазон вносимого ослабления 31 дБ, шаг 1 дБ) и 6-разрядного фазовращателя X-диапазона частот (диапазон вносимого фазового сдвига 355°, шаг 5,625°), выполненных на основе процесса D01GH компании OMMIC.

Ключевые слова: монолитная интегральная схема, нитрид галлия, аттенюатор, фазовращатель, X-диапазон частот.

В современной микроэлектронике существует тренд реализации маломощных функциональных узлов, отвечающих за преобразование частоты, а также амплитудно-фазовое управление на основе SiGe и

CMOS-процессов, что позволяет добиться более высокой степени интеграции на одном кристалле, включая цифровую часть, а также получить выигрыш в соотношении технических параметров и цены при массовом производстве. Однако данный подход может оказаться неприемлемым для российских потребителей заказных микросхем, поскольку отечественные объемы их потребления не соответствуют типовой загрузке кремниевых фабрик, расходы на изготовление опытных образцов оказываются неоправданно высоки, и окупаемость на этапе серийного производства в требуемых объемах не достигается.

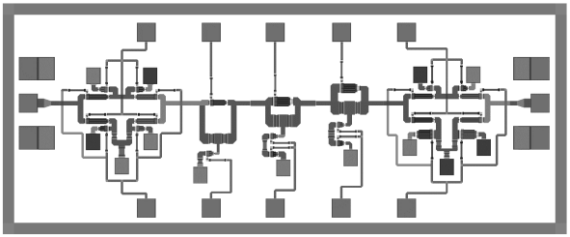
Альтернативным подходом может являться использование нитридгаллиевых процессов, ориентированных на создание не только мощных усилителей и коммутаторов, но и широкого спектра функциональных узлов, включая частотно-преобразовательные и управляющие схемы. Конечно, подобный подход будет проигрывать по уровню интеграции использованию SiGe- и CMOS-процессов, однако может являться компромиссным решением по совокупности технико-экономических критериев. В данной статье представлены результаты проектирования функциональных узлов аттенюатора и фазовращателя на основе GaN технологического процесса D01GH компании OMMIC [1].

Проектирование монолитных интегральных схем. В качестве коммутационных элементов в схемах аттенюатора и фазовращателя выступают нормально открытые полевые транзисторы с затвором Шоттки, работающие в режиме управляемого сопротивления канала. Они уже давно и прочно заняли свое место среди прочих управляемых элементов малой и средней мощности и в сравнении с PIN-диодами обладают такими преимуществами, как более высокое быстродействие, малая мощность потребления по цепям управления, а также более простая реализация драйверов управления.

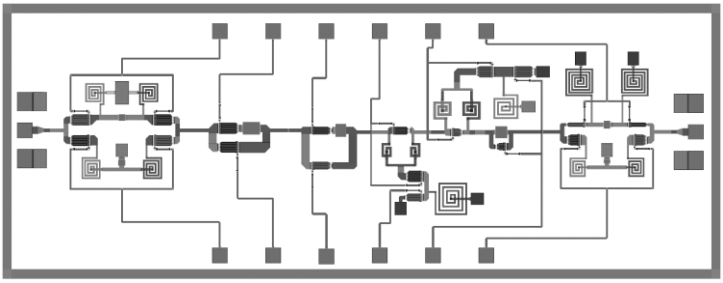
Функциональный узел аттенюатора содержит в своем составе пять секций дискретно-коммутационного типа с номинальным вносимым ослаблением 1, 2, 4, 8 и 16 дБ. Младшие разряды (1, 2, 4 дБ) выполнены на основе Т-образных аттенюаторов. Основными достоинствами такого схемного решения являются малые вносимые потери и компактность при последующей топологической упаковке. Что касается старших секций (8 и 16 дБ), то они реализованы на основе переключаемых звеньев [2]. Данное решение обеспечивает малые неравномерность вносимого ослабления и паразитную фазовую конверсию, а также низкий уровень рассогласования секций по входу и выходу в широкой полосе рабочих частот (0–20 ГГц). К недостаткам схемного решения на основе переключаемых звеньев следует отнести большие вносимые потери и занимаемую площадь на кристалле.

Функциональный узел фазовращателя содержит в своем составе шесть секций с номинальным вносимым фазовым сдвигом 5,625; 11,25; 22,5; 45; 90 и 180°. Старшие секции (90 и 180°) выполнены на основе коммутируемых звеньев фильтра верхних частот (ФВЧ) и фильтра нижних частот (ФНЧ) третьего порядка. Достоинствами данного схемного решения являются малая неравномерность вносимого фазового сдвига в рабочей полосе частот и низкая чувствительность вносимого фазового сдвига и паразитной амплитудной конверсии к технологическому разбросу. Недостаток – высокие начальные потери в сравнении с другими решениями. В младших секциях (5,625 и 11,25°) коммутация производится между «вырожденными» ФВЧ- и ФНЧ-конденсатором и отрезком линии соответственно. Такое схемное решение уменьшает вносимые потери. В секциях со сдвигом 22,5 и 45° коммутационные элементы входят в состав фазосдвигающих цепей, что является компромиссным решением по таким показателям, как чувствительность ключевых электрических параметров к технологическому разбросу параметров коммутационных элементов, уровень начальных потерь и габаритные размеры секции.

Топологии кристаллов функциональных узлов аттенюатора и фазовращателя представлены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Топологии аттенюатора, габаритные размеры 2500×1000 мкм (*а*) и фазовращателя, габаритные размеры 3700×1500 мкм (*б*)

Проектирование функциональных узлов выполнено в системе автоматизированного проектирования AWR Design Environment, в том числе с использованием модуля электромагнитного анализа AXIEM. Результаты моделирования частотных зависимостей характеристик и ошибок управления для аттенюатора и фазовращателя представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

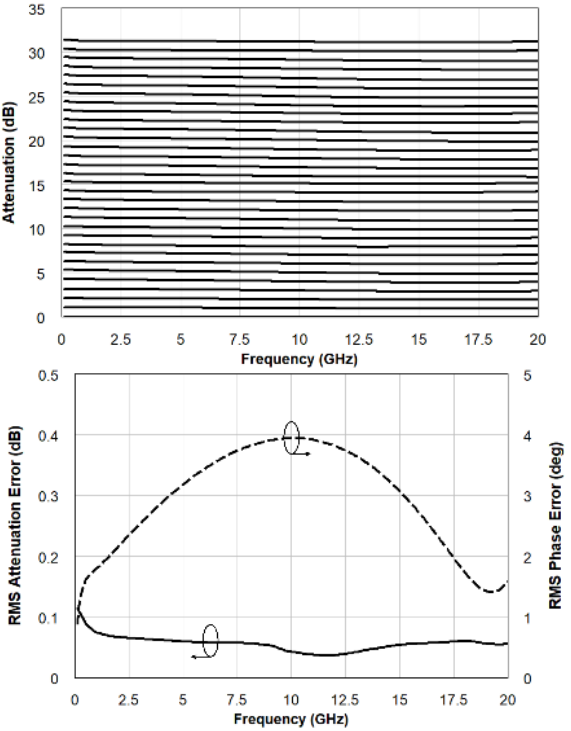


Рис. 2. Частотные зависимости вносимого ослабления, СКО ошибки ослабления и паразитной фазовой конверсии для аттенюатора

Вносимые потери в опорном состоянии для функциональных узлов аттенюатора и фазовращателя (в полосах рабочих частот) составляют не более 6 и 8 дБ соответственно. Возвратные потери по входу и выходу для обоих узлов – не менее 11 дБ.

Заключение. Переключение состояний схем осуществляется уровнями 0–5 В, подаваемыми на затворы коммутационных элементов. В дальнейшем планируется разработка и интеграция в состав СВЧ-узлов драйвера управления, который позволит использовать уровни ТТЛ в качестве внешних управляющих сигналов.

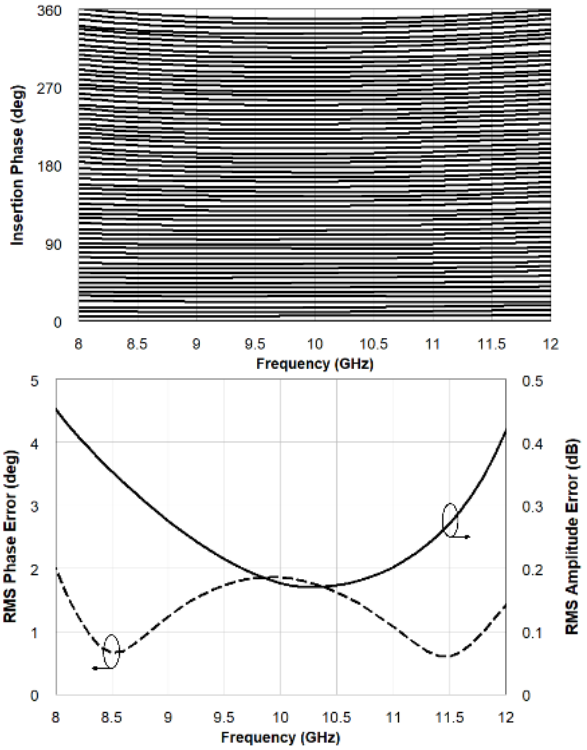


Рис. 3. Частотные зависимости вносимого фазового сдвига,
СКО фазовой ошибки и амплитудной конверсии для фазовращателя

Кроме того, конечной целью является интеграция разработанных функциональных узлов на один кристалл с включением усилительных каскадов и системы коммутации режимов приема и передачи, то есть реализация многофункциональной схемы, аналогичной [2], но обладающей большим потенциалом в части уровней выходной мощности, что в некоторых приложениях может позволить отказаться от использования выходного усилителя мощности в виде отдельного кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт компании OMMIC, Франция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ommic.com/ (дата обращения: 17.02.2020).

2. Гугин А.Ю., Кондратенко А.В. Монолитная интегральная схема управления амплитудой и фазой сигнала X-диапазона частот // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017) // Матер. 27-й Междунар. Крым. конф. – 2017. – Т. 1. – С. 78–84.

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 65.01.007

СПОСОБЫ SMM-ПРОДВИЖЕНИЯ ФОТОГРАФА

М.А. Бабенко, студент каф. ТУ
Научный руководитель В.А. Семиглазов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, geralt99671@gmail.com

Существуют некоторые способы продвижения фотографа, используя которые, можно повысить уровень осведомленности у потребителей и существенно увеличить приток клиентов.
Ключевые слова: охват, потребитель, таргетированная реклама, рассылка, осведомленность.

Что является целью деятельности любой коммерческой организации? Успешное функционирование, результатом которого станет получение прибыли. А в идеале еще и стабильное ее увеличение. В таком случае возникает вопрос, как добиться таких результатов. Очевидно, что для увеличения количества продаж необходимо повысить уровень осведомленности потребителей предлагаемой продукции или услуг. Из этого следует сделать следующий вывод: продвижение необходимо любому бизнесу в различных сферах. В данной статье рассмотрим способы продвижения такого вида деятельности, как фотография.

Начинающие фотографы снимают друзей, знакомых, набираются опыта и составляют портфолио, но со временем этого становится недостаточно. Хоть рекомендации друзей, знакомых по поводу того, к кому обратиться за услугой, по-прежнему остаются мощным способом привлечения клиентов, нужно помимо этого использовать дополнительные инструменты, которые значительно увеличат количество продаж.

Для того чтобы повысить охват, фотографу необходимо, чтобы люди узнали о его существовании и о том, какие услуги он может предложить. На практике было выявлено, что достаточно эффектив-

ным способом является рассылка «ВКонтакте», направленная на целевую аудиторию. Как правило, целевая аудитория портретного фотографа – это лица женского пола от 20 до 30–35 лет. Так как в «ВКонтакте» существует ограничение на отправку сообщений (до 20 сообщений в день), то выбираются люди из целевой аудитории, у которых день рождения сегодняшней датой. Текст рассылки можно разделить на 3 блока. В первом блоке содержится само поздравление человека с днем рождения. Это позволяет изначально расположить человека к себе, в результате чего потенциальный клиент будет лояльнее относится к воздействующей на него на данный момент рекламе.

Также отлично работает таргетированая реклама, направленная на узкую целевую аудиторию [1]. Например, «ВКонаткте» нашлось почти две тысячи девушек со статусом «помолвлена». Им вполне можно предложить свадебную съемку или love-story.

Важное значение в работе фотографа имеет общение со своей аудиторией. Помимо фотографий со съемок в «Инстаграм» необходимо выкладывать определенный контент, затрагивающий в какой-то степени личную жизнь фотографа, а также задавать вопросы подписчикам и выводить их на диалог. «Instagram» имеет множество инструментов для общения с аудиторией. Для повышения уровня доверия потенциальных клиентов важно показывать то, что остается за кадром съемок. Это могут быть видеобэкстейджи, селфи с клиентами. Смотря это в аккаунте фотографа, подписчики могут оценить для себя уровень профессионализма фотографа в плане работы с моделью.

Для того чтобы привлечь новых клиентов, нужно посмотреть вокруг и поискать тех, кто сопряжен с рынком фотографических услуг [2]. Необходимо наладить контакт с ними. Это можно сделать поразному: предлагать свои услуги в качестве дополнительных, распространять скидочные купоны, которые добавят привлекательности к их предложению и одновременно будут способствовать продвижению. Такая система с каждым годом работает все лучше и эффективнее.

Также можно предоставлять скидки, приуроченные к каким-либо событиям/праздникам. Такими партнерами могут стать фотовидеостудии, видеографы, стилисты, визажисты, модели. Продвигая себя через партнеров, очень важно правильно выбрать свою нишу. Если знать, кто наш клиент и что его интересует, то он найдется именно там. Необязательно, чтобы оба бренда быть известными. Гораздо важнее предлагать сервис подходящего уровня: нельзя объединяться с компанией экстра-класса, предлагая услуги среднего уровня. Правильнее будет сделать предложение, равное уровню партнера.

Отслеживая статистику, необходимо корректировать свои действия в зависимости от реакции аудитории.

Резюмируя, можно сказать, что, придерживаясь вышеперечисленных советов и используя данные уже проверенные способы продвижения, можно повысить уровень осведомленности клиентов об услуге и как следствие увеличить прибыль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Словарь маркетолога. Таргетированная реклама [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.calltouch.ru/glossary/targetirovannaya-reklama/ (дата обращения: 23.12.2019).

2. Бабенко М.А. Бизнес-план открытия нового предприятия по оказанию фотоуслуг с использованием элементов компьютерной графики. – Томск, 2019. – 46 с.

УДК 681.518.3

МЕТОДЫ ТРИАНГУЛЯЦИИ И ТРИЛАТЕРАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

И.А. Есентаева, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, i.esentaeva@mail.ru

Рассматриваются технологии обнаружения объектов в подземных и закрытых сооружениях. А именно методы триангуляции и трилатерации.

Ключевые слова: позиционирование, триангуляции и трилатерации.

В настоящее время одной из актуальных проблем является система позиционирования внутри закрытых помещений. Согласно данным Strategy Analytics, пользователи мобильных приложений используют около 80% трафика внутри здания. А в настоящее время существует большое количество зданий, имеющих большой объем и сложную конструкцию, людям, впервые посещающим, даже часто посещающим, трудно найти нужные места внутри здания. Потому что внутри здания системы GPS и ГЛОНАСС не могут отображать конкретное место. В целях устранения таких трудностей используются внутренние системы позиционирования (indoor – навигации).

В этой работе мы используем методы триангуляции и трилатерации для определения местоположения движущегося объекта в закрытом помещении. То есть, метод триангуляции заключается в вычислении координат движущегося объекта путем проведения угловых измерений. И метод трилатерации – путем измерения расстояний – определяет положение движущегося объекта. Для создания угловых

размеров и определения расстояния используются маяки с определенными координатами. Между маяком и мобильным объектом используются высокоточные (1800, 2000, 2200, 2400 МГц) сигналы.

Позиционирование методом триангуляции. Существует два типа позиционирования движущегося объекта: относительное и абсолютное. Относительное и абсолютное позиционирование дополняют друг друга и обычно сочетаются с фильтром Калмана. В большинстве случаев абсолютное позиционирование обеспечивается триангуляцией или трилатерацией на основе маяков. Триангуляция – это процесс определения положения (положения и ориентации робота) на основе измерения угла, а методы трилатерализации включают определение положения робота на основе измерения расстояния. Благодаря наличию угловых систем для измерения углов, триангуляция широко используется надежным, точным и гибким способом.

Другое преимущество триангуляции перед трилатерацией состоит в том, что робот может рассчитывать свою ориентацию (или направление) в дополнение к своей позиции, чтобы можно было найти полную позицию робота. Процесс определения положения робота на основе его угловых размеров обычно называется триангуляцией. Слово триангуляция – это широкое определение, которое определяет углы, которые может измерить робот или маяк, количество углов, которые он использует. В этой статье мы заинтересованы в определении нашей ниши, какие углы измеряются от местоположения робота.

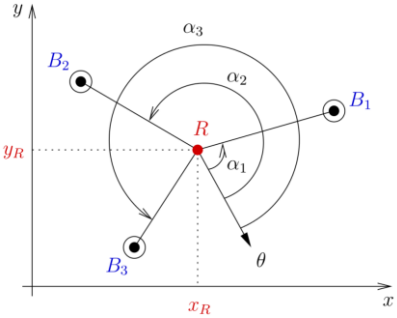


Рис. 1. Настройка триангуляции в плоскости 2D: R – робот; B_1, B_2 и B_3 – маяки

Принцип триангуляции существует давно, и до сих пор предлагалось множество методов. Одними из первых авторов всесторонних обзорных работ стали Коэн и Косс. Они в своей работе классифицируют алгоритмы триангуляции на четыре группы: 1) геометрическая триангуляция; 2) пересечение геометрических окружностей; 3) итера-

ционные методы (итерационный поиск, Ньютон–Рафсон); 4) триангуляция нескольких маяков.

Как и в случае хорошего алгоритма триангуляции, вам не нужно беспокоиться о получении точных результатов с хорошими датчиками, которые обеспечивают точные угловые измерения. Действительно, датчик угла может быть нелинейным в диапазоне измерения угла (полный оборот). В то же время расположение маяков, обычно измеряемых вручную, подвергается погрешностям, непосредственно влияющим на алгоритм позиционирования. Лоевский и Шимшони в своей работе предлагают способ калибровки датчика и корректировки измеренного положения маяка. Они эффективны и обязательны для достижения хороших характеристик позиционирования.

Большинство алгоритмов триангуляции по-прежнему имеют существенные ограничения. Например, некоторые требуют определенного режима маяков, существуют слепые зоны или работают только в пределах треугольника, определенного на трех маяках. Есть надежные методы, но они имеют возрастающую сложность или требуют индивидуального подхода к определенным пространственным механизмам.

Позиционирование методом трилатерации. Анализ информации, полученной от маяков методом трилатерации. Метод трилатерации позиционирует объект по принципу, применяемому в геодезии. Основная задача – разработать способ определения расстояния между источником и приемником. Для этого мы используем параметры определенных сетей Wi-Fi, такие как максимальная скорость Wi-Fi, ее уровень, сетевой MAC-адрес и точные координаты точек доступа Wi-Fi. Уровень сигнала, полученный с помощью мобильного устройства, может быть использован для оценки расстояния между точкой доступа и мобильным устройством.

При применении данного метода предусматриваются три и более точек входа, расположенных в одном этаже здания. Уровни сигналов этих точек будут экспоненциально уменьшаться в зависимости от расстояния между передатчиком и приемником и коэффициента шума. Таким образом, эту зависимость можно рассматривать как функцию расстояния. Согласно оценкам уровня сигнала, расстояние представлено кругом с радиусом вокруг точки доступа. Пересечение трех точек входа радиусов определяет точку приема или область.

На рис. 2 каждый из трех радиусов соответствует уровню сигнала внутри круга. Это может быть решено путем построения модели распределения сигналов внутри здания. Появление и отражение помех при передаче в помещении являются основными причинами ошибок местоположения. Кроме того, это зависит от частоты сигнала, наличия

помех и отражающих поверхностей, а также от местоположения приемника и многих других факторов. Для этого можно использовать формулу потери сигнала для свободного пространства:

$$\mathrm{FSPL} = 20\log 10(d) + 20\log 10(f) - 27{,}55,$$

где d – расстояние между источником и приемником; f – частота сигнала; FSPL – потеря мощности сигнала в дБ.

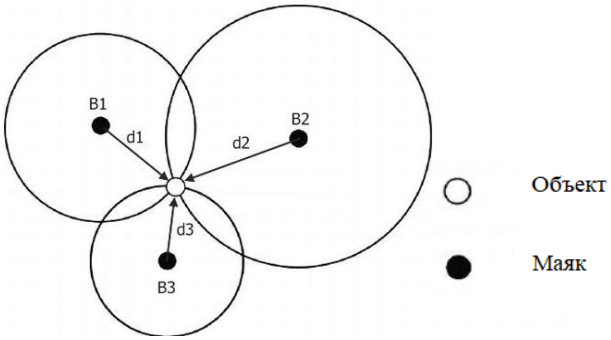


Рис. 2. Отображение позиционирования методом трилатерации

Основная проблема, которая сталкивается с разработчиками алгоритмов позиционирования внутри помещения, это большое количество отраженного сигнала. Это явление, характерное для всех систем позиционирования, основано на измерении времени передачи или отключении сигнала. Для трилатерации это отрицательно влияет, длина пути измеряется с большой погрешностью, тем самым увеличивает общую погрешность позиционирования. Непосредственная видимость может уменьшить отклонение, следовательно, может уменьшить погрешность. Поэтому есть предложение разместить точки прямой видимости

Погрешность трилатерации зависит от того, как расположены измерители. Измеритель содержит только информацию о расстояниях до объекта. Лучше нарисовать круги, чтобы они равномерно распределялись по поверхности, а также находились в периметре. Точки размещения приемных маяков должны располагаться по периметру здания и в шахматном порядке.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Melo LF и др. Автономная навигация в помещении мобильного робота с оценкой положения с использованием триангуляции ВЧ-сигнала. – 2013.

2. Borenstein J. et al. Где я? Датчики и методы позиционирования мобильного робота // Мичиганский университет. – 1996. – Т. 119, № 120. – С. 27.

3. Келли А. Точное разбавление в триангуляционной оценке положения мобильного робота // Интеллектуальные автономные системы. – 2003. – Т. 8. – С. 1046–1053.

4. Фаркас К., Хушак А., Годор Г. Оптимизация размещения точек доступа Wi-Fi для локализации внутри помещений // Журнал ИИТ (Информатика и ИТ сегодня). – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 28–33.

УДК 004.932.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И.А. Есентаева, магистрант каф. ТУ

Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, i.esentaeva@mail.ru

Исследованы различные интерполяционные методы в области обработки изображений: метод ближайшего соседа; билинейная интерполяция; бикубическая интерполяция; новая краевая интерполяция (NEDI), триангуляция, зависящая от данных (DDT), и итеративная интерполяция на основе кривизны (ICBI).

Ключевые слова: неадаптивные методы, адаптивные методы, интерполяция**.**

Улучшение абстрактных изображений является важной задачей обработки в области обработки изображений. В современную цифровую эпоху разрабатываются методы интерполяции изображений, основанные на методе мультиразрешения – открыл и усовершенствовал. Интерполяция изображений происходит во всех цифровых фотографиях, когда вы изменяете размер или развёртку изображения из одной сетки пикселей в другую. Существует множество методов улучшения изображения.

Интерполяция – это метод, в котором мы оцениваем приблизительное значение продолжения функции. Процесс интерполяции изображений заключается в получении изображения с высоким разрешением из изображения с низким разрешением. Методы интерполяции в основном делятся на две категории:

1. Неадаптивные методы.

2. Адаптивные методы.

Неадаптивные методы интерполяции основаны на прямых манипуляциях с пикселями вместо рассмотрения какой-либо функции или содержимого изображения. Эти методы следуют одному и тому же шаблону для всех пикселей, просты в исполнении и имеют меньшие затраты на вычисления. Различные неадаптивные методы являются ближайшими соседями, билинейными и бикубическими.

Ближайшая соседняя интерполяция: это самая простая интерполяция. В этом методе каждому интерполированному выходному пикселю присваивается значение ближайшей точки выборки во входном изображении. Ядро интерполяции для ближайшего соседа

$$h(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 0, \\ 1 & |x| < 0. \end{cases}$$

АЧХ ближайшего соседа ядра

$$H(\omega) = \mathrm{sinc}(\omega/2).$$

Билинейная интерполяция. Хотя этот метод очень эффективен, качество изображения очень низкое. Это потому, что преобразование Фурье прямоугольной функции эквивалентно функции sinc; с его усилением в полосе пропускания быстро падает. Кроме того, он имеет выступающие боковые доли в логарифмическом масштабе:

$$h(x) = \begin{cases} 0 & |x| > 0, \\ 1 & |x| \ \ |x| < 1. \end{cases}$$

x – расстояние между двумя точками, подлежащими интерполяции.

Бикубическая интерполяция – это продвижение по кубической интерполяции в двумерной регулярной сетке. Интерполируемая поверхность более гладкая, чем соответствующие поверхности, полученные вышеупомянутыми методами билинейной интерполяции и интерполяции ближайших соседей. Он использует многочлены, кубический или кубический алгоритм свертки. Интерполяция кубической свертки определяет значение уровня серого из средневзвешенного значения 16 ближайших пикселей к указанным входным координатам и присваивает это значение выходным координатам, первым четырем одномерным. Для бикубической интерполяции (интерполяции кубической свертки в двух измерениях) число точек сетки, необходимых для оценки функции интерполяции, равно 16, две точки сетки по обе стороны от рассматриваемой точки как для горизонтального, так и для перпендикулярного направления. Ядром интерполяции бикубической свертки является

$$W(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & \text{для } |x| \le 1, \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & \text{для } |x| < 2. \end{cases}$$

Адаптивные методы учитывают такие характеристики изображения, как значение интенсивности, краевая информация, текстура и т.д. Неадаптивные методы интерполяции имеют проблемы размытия краев или артефактов вокруг краев и сохраняют только низкочастотные компоненты исходного изображения. Для лучшего визуального качества изображения необходимо сохранить высокочастотные компонен-

ты, и эта задача может быть решена с помощью адаптивных методов интерполяции. Эти методы дают лучший результат, чем неадаптивные методы, но требуют больше вычислительного времени. Различные адаптивные методы – это NEDI, DDT, ICBI и др.

Новая краевая интерполяция. Методика NEDI представляет собой комбинированный подход билинейной интерполяции и адаптивной интерполяции на основе ковариации. В методах линейной интерполяции есть размытые края и артефакты. Главным образом, две цели для внедрения метода NEDI: во-первых, для получения лучшего визуального качества, чем для методов линейной интерполяции (билинейной и бикубической), а во-вторых, для уменьшения вычислительной сложности метода адаптивной интерполяции на основе ковариации.

Зависимая от данных триангуляция. Метод зависимой от данных триангуляционной интерполяции разработан для улучшения визуального качества изображения и уменьшения вычислительной сложности изображения по сравнению с другими методами линейной интерполяции. DDT в основном используется для преодоления недостатков техники билинейной интерполяции.

Итеративная интерполяция на основе кривизны. Метод интерполяции на основе итеративной кривизны фокусируется на оценке направления и на основе производных второго порядка. Техника ICBI представляет собой комбинацию двух техник. В первом методе новые пиксели вычисляются путем интерполяции по направлению (FCBI, интерполяция на основе быстрой кривизны). Во втором методе мы модифицировали интерполированные пиксели, используя итерационный метод с энергетическим членом для сохранения краев. Общая процедура для метода ICBI выглядит следующим образом:

Шаг 1: поместите исходные пиксели в увеличенную сетку в местах $2i$, $2j$.

Шаг 2: вставьте пиксели в местах $2i+1,2\ j+1$ с помощью метода FCBI.

Шаг 3: применяйте итеративную коррекцию до тех пор, пока изменение изображения не превысит заданный порог.

Шаг 4: вставьте пиксели в оставшиеся места с помощью метода FCBI.

Шаг 5: примените итеративную коррекцию к добавленным пикселям.

Шаг 6: повторите всю процедуру на новом изображении для дальнейшего увеличения.

Вывод. Адаптивные методы лучше с точки зрения визуального отображения изображения, но это занимает больше вычислительного времени. Когда время не является препятствием, мы выбираем адап-

тивную технику, в противном случае предпочтительны неадаптивные методы. В будущем можно объединить эти адаптивные и неадаптивные методы, чтобы преодолеть их индивидуальные недостатки, и сделать полученное изображение лучше с точки зрения визуального облика и с точки зрения вычислительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Гуров А.А., Порфирьева Н.Н. Вопросы оценки контрастности сюжетных изображений // Труды ГОИ им. С.И. Вавилова. – 1979. – Т. 44, вып. 178. – С. 31–34.

3. Интерполяция цифрового изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials/image-interpolation.htm

УДК 004.932.4

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ КЛАССИФИКАЦИИ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ ДЛЯ ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ

Т.Ю. Гребёнкина, студентка каф. ТУ

Научный руководитель Е.В. Зайцева, доцент каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, katerinka_zev@mail.ru

Представлен обзор системы распознавания дорожных знаков, в частности разработка и использование критериев классификации дорожных знаков для их распознавания.

Ключевые слова: критерии, распознавание, изображение, дорожный знак.

Создание системы распознавания дорожных знаков является актуальным в настоящее время, так как такая система позволяет повысить безопасность процесса дорожного движения.

Система для распознавания состоит из следующих блоков:

1. Предварительная обработка изображения.
2. Сегментация дорожного знака.
3. Распознавание дорожного знака.

Для распознавания дорожных знаков используется обученная нейронная сеть.

Но так как в процессе дорожного движения присутствует много внешних факторов, распознавание знаков может быть затруднено. Изменение погодных условий, посторонние объекты, освещение и др., создают шумы и искажение. Таких ситуаций на каждый знак может быть множество – для этого необходимо квалифицировать дорожные знаки, чтобы упросить процесс выборки, поиска и распознавания.

И поэтому целью данной работы является разработка критериев классификации дорожных знаков, которые будут учитываться при распознавании знаков независимо от условий внешней среды.

Критерии классификации для распознавания знака. Для качественной работы сети и получения верных результатов распознавания требуется создание критериев для разделения знаков, а также для улучшения скорости и точности определения дорожного знака.

Для обеспечения непрерывного и безопасного процесса дорожного движения установка знаков происходит по определенным правилам. На данный момент в Российской Федерации дорожные знаки устанавливаются согласно ГОСТ Р 52289–2004 [1]. Существует несколько категорий знаков, цвет и форма которых зависят от того, к какой категории они относятся. Ниже представлены критерии, по которым можно классифицировать дорожные знаки для дальнейшего их распознавания.

По форме дорожного знака. За основу разработки критерия берется форма дорожного знака. Следовательно, классификаторами будут являться формы: треугольник, круг, квадрат, прямоугольник, ромб. Наличие критерия «по форме знака» является одним из важных критериев определения знака во время его сегментации.

По содержанию и информации со знака. Знаки можно разделять по той информации, которую они несут, а точнее – по тому, что на них изображено. Изображения на дорожных знаках бывают следующие:

– цифры (скорость или иной численный указатель);

– стрелки (направление движения, тип движения, полосы и т.д.);

– линии (повороты, тип дороги, приближение к переезду и т.д.);

– «человечек» (пешеходный переход, жилая зона и т.д.);

– «пустой» знак (движение запрещено, уступите дорогу и т.д.);

– транспорт (все знаки с изображением какого-либо транспорта, в том числе и велосипед);

– животные;

– буквы (знаки населенного пункта и т.д.);

– другое (любые картинки не входящие в группы выше, изображения зоны отдыха, пункта питания и т.д.).

По частоте размещения знака на дороге. Данный критерий подразумевает, что первым делом выборка будет проходить в группе наиболее встречающихся на дороге знаках, а потом, если знак не будет найден, то уже по вышеперечисленным критериям. Необходимо будет взять следующие наиболее часто встречающиеся знаки дорожного движения: «Ограничение скорости» (со всеми значениями ограничений), «Въезд запрещен», «Пешеходный переход», «Главная доро-

га», «Уступите дорогу», «Движение прямо», «Движение налево», «Движение направо», «Движение прямо или налево», «Движение прямо или направо», «Обгон запрещен» и «Конец зоны запрещения обгона».

По рамке или контуру знака. Часть дорожных знаков имеют так называемую рамку. При распознавании знака обученная нейронная сеть будет выявлять наличие и отсутствие рамки у знака, тем самым отбрасывая не подходящие. И выборка будет делаться уже в гораздо меньшем количестве изображений.

Заключение. Предобработка изображений позволяет создать имитацию влияния внешних условий на качество получаемых снимков, тем самым создать базу для обучения модели аугментации изображений. На данной модели происходит обучение нейронной сети для распознавания дорожных знаков. Но прежде чем распознавать, для упрощения процесса требуется их классифицировать. Предложенные выше критерии классификации помогут повысить эффективность распознавания дорожных знаков.

Процесс распознавания дорожного знака будет проходить в следующем виде.

1. Обрезка области со знаком после сегментирования.
2. Преобразование изображения дорожного знака в черно-белый вариант.
3. Изменение размера области со знаком до 48×48 пикселей. Так как база предобработанных изображений дорожных знаков будет этого же размера.
4. Запускается нейронная сеть, обученная на созданной базе дорожных знаков.
5. Выводится результат распознавания.

Сеть по сопоставлению области со снимка и имеющихся в базе сымитированных искаженных изображений дорожных знаков распознает его по наиболее высокому проценту соответствия снимку.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52289–2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/gost-r-52289–2004 (дата обращения: 11.03.2020).

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

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 621.38

АНАЛИЗ ОТРАСЛИ «РАДИОФОТОНИКА» В РОССИИ

Л.Н. Андрийчук, студент каф. УИ
г. Томск, ТУСУР, lyana.andrii4uck@yandex.ru

Представлен обзор современного состояния такой отрасли, как радиофотоника в России. Приведены история развития радиофотоники, основные проблемы данной отрасли, а также ее перспективные направления.
Ключевые слова: радиофотоника, микроволновая фотоника, обзор радиофотоники, радиофотоника в России.

Радиофотоника или микроволновая фотоника – это новое междисциплинарное направление, созданное на стыке СВЧ-радиоэлектроники и фотоники. Также радиофотонику можно определить как слияние радиоэлектроники, оптики, СВЧ-оптоэлектроники и ряда других областей науки [1]. Западные исследователи обозначают данное направление термином MWP – microwavephotonics. В России же термин радиофотоника стал применяться по предложению академика РАН Ю. Гуляева.

Многие исследователи отмечают, что сегодня наступает эпоха радиофотоники. Иначе говоря, несмотря на сложную практическую реализацию этого направления, оно позволит вывести системы передачи информации на новый уровень.

Если обратиться к источникам, то можно отметить, что начало радиофотоники в СССР и в мире было положено в конце 50-х – начале 60-х годов XX в., так как в тот период только появлялись предпосылки к ее созданию в виде научных исследований в области создания измерительного оборудования. После распада СССР в радиофотонике, как и во многих отраслях науки, наблюдался значительный спад развития. Возрождаться радиофотоника в России начала сравнительно

недавно, а первая дорожная карта, направленная на развитие данной отрасли, была создана в 2013 г. [2].

Сегодня в России радиофотоника – это то направление, которое концентрирует в себе работу многих ведущих предприятий и научных организаций. Работу в данной отрасли поддерживают Минобороны, Минэкономразвития и Министерство науки и высшего образования РФ [2].

Но, несмотря то, что оказывается активная поддержка со стороны государства, в развитии радиофотоники обнаруживается ряд проблем.

При условии, что Россия на сегодняшний день обладает научным потенциалом и опытом изучения и создания разработок в области радиофотоники, у нас наблюдается отставание от других стран. Действительно, радиофотоника в нашей стране является слабо известной отраслью [3]. Прежде всего, это объясняется появлением факторов, сдерживающих работы, таких как отсутствие отечественной элементной базы и программных продуктов для создания топологий и моделирования устройств. Данная особенность порождает еще одно затруднение – нерешенная проблема импортозамещения в дальнейшем может вызвать угрозу национальной безопасности.

Также при формировании перечня приоритетных направлений развития науки и технологий фотоника и радиофотоника не были приняты во внимание, а первая программа, направленная на поддержку радиофотоники, была составлена только в 2013 г. [2]. Это, конечно, снижает уровень государственной поддержки отрасли и затрудняет решение серьезных задач в этой области.

Кроме того, несмотря на то, что в области радиофотоники работают многие предприятия, научно-исследовательские институты и центры, задействована вузовская наука и др., отрасль сегодня требует объединенной работы, направленной на получение конкретных результатов, чего в России на сегодняшний день не наблюдается. Например, проблему создания отечественной компонентной базы, по оценке экспертов, возможно решить при проведении совместных работ предприятий, относящихся к радиофотонике.

Но при этом, по словам научного руководителя Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН академика Ю. Гуляева в интервью для научно-технического журнала «Интеллект & Технологии», при решении определенных проблем, у России есть шансы найти и занять свои ниши в сфере радиофотоники и с развитием данной отрасли перейти к 6-му технологическому укладу [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С. Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотон-

ной технологии // Российский технологический журнал. – 2016. – № 1 (10). – С. 4–20.

2. Васильев С., Фомишенко Р. У России есть хорошие шансы занять свои ниши в сфере радиофотоники // Интеллект & Технологии. – 2017. – № 4 (19) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=89353ab9-19f5-418a-9d10-dd4bfa6ad813&print=1 (дата обращения: 07.03.2020).

3. Птичкин С. РЛС прибавят зоркости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rg.ru/2018/04/22/radiofotonika-stanet-drajverom-sovremennoj-radioelektroniki.html (дата обращения: 07.03.2020).

УДК 621.396.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В КАНАЛАХ С АДДИТИВНЫМ БЕЛЫМ ГАУССОВСКИМ ШУМОМ

И.А. Белокрылов, студент каф. ТОР

Научный руководитель Д.А. Покаместов, доцент каф. ТОР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, dmaltomsk@mail.ru

Получен результат прохождения сигнала через систему связи с OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), используя канал с аддитивным белым гауссовским шумом, кодом Рида–Соломона, сверточным кодом, турбокодом и LDPC-кодом. Исследованы зависимости битовой вероятности ошибки (BER – bit error ratio) от отношения сигнал/шум (SNR – signal noise ratio) при различных помехоустойчивых кодах и модуляциях.

Ключевые слова: OFDM, AWGN, помехоустойчивое кодирование, коды Рида–Соломона, LDPC-коды, сверточные коды, турбокоды, модель канала.

Одна из наиболее острых проблем в информационных технологиях – защита данных от помех. При передаче данных от источника к приемнику информация подвержена воздействию внешних шумов, искажающих форму передаваемых сигналов и тем самым делающих невозможным однозначное распознавание сообщения. В такой ситуации становится актуальным использование специальной технологии, позволяющей обнаруживать и исправлять искажения. Такой технологией является внедрение в систему передачи и приема сигнала помехоустойчивых кодов, которые решат проблему с помехами [1].

Существует множество систем для передачи данных. В этой работе была рассмотрена технология OFDM с помехоустойчивым кодом

Рида–Соломона, LDPC-кодом, турбокодом и сверточным кодом для защиты информации от помех [2].

Модель канала. Для исследования эффективности помехоустойчивого кодирования в канале с аддитивным белым гауссовским шумом были построены модели, имеющие общие параметры:

– количество OFDM-символов – 8;

– отношение сигнал/шум – 0:30 дБ;

– скорость кодирования методом Рида–Соломона, LDPC-кодом, турбокодом и сверточным кодом – 1/3;

– виды модуляции BPSK, QPSK, 16-QAM.

Для примера, на рис. 1 приведена структурная схема системы OFDM с RS кодером.

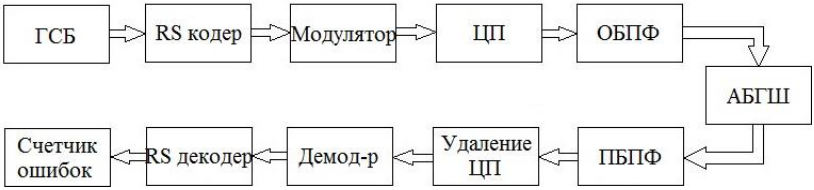


Рис. 1. Структурная схема

Результатом работы являются графики зависимостей битовой вероятности ошибки от отношения сигнал/шум. На рис. 2–4 изображены данные зависимости для модуляции 16-QAM, QPSK и BPSK с использованием LDPC-кода, кода Рида–Соломона, сверточного кода и турбокода, а также приведена зависимость без использования кодов.

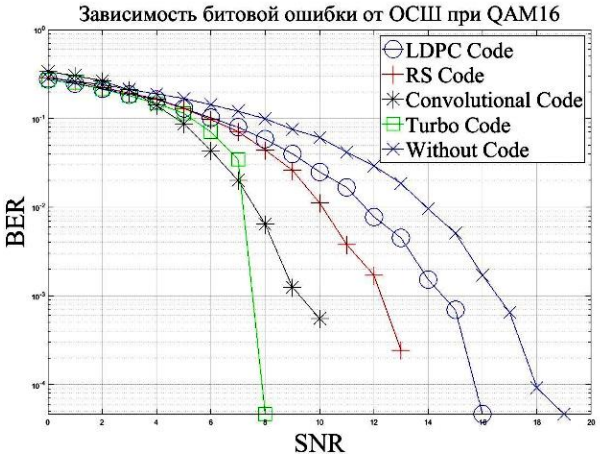


Рис. 2. Зависимость BER от SNR для модуляции 16-QAM

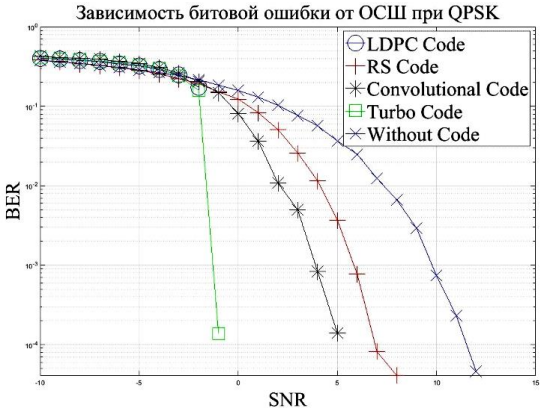


Рис. 3. Зависимость BER от SNR для модуляции QPSK

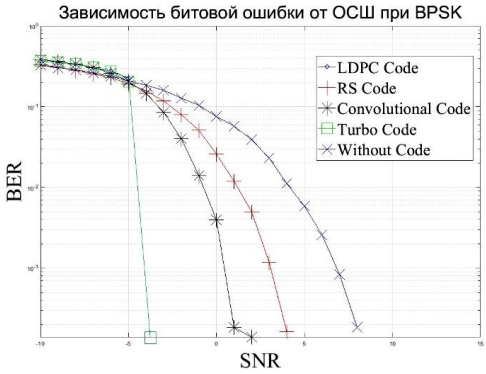


Рис. 4. Зависимость BER от SNR для модуляции BPSK

Из приведенных зависимостей можно понять, что самым помехоустойчивым кодом при любой манипуляции является турбокод, который идеально декодирует полученное сообщение. В случае с модуляцией 16-QAM полное восстановление сообщение происходит при SNR = 8 дБ. В случае с модуляцией QPSK – при SNR = –1 дБ. В случае с модуляцией BPSK – при SNR = –4 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коды Рида–Соломона в системах обнаружения и исправления ошибок при передаче данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/kody-rida-solomona-v-sistemah-obnaruzheniya-i-ispravleniya-oshibok-pri-peredache-dannyh (дата обращения: 21.01.2020).

2. Кодирование информации с применением кодов Рида–Соломона [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=7469 (дата обращения: 22.01.2020).

УДК 004.738.5

МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАНКА ФИЛЬТРОВ

З.О. Поддубная, магистрант каф. ТОР

Научный руководитель Р.Р. Абенов, ст. преп. каф. ТОР

г. Томск, ТУСУР, renat.abenov@tusur.ru

Рассмотрена технология FBMC. Были определены достоинства и недостатки технологии. Произведено сравнение спектров двух технологий OFDM и FBMC. В пакете Matlab была промоделирована работа метода.

Ключевые слова: OFDM, FBMC, приемник и передатчик, 5G, банк гребенчатых фильтров, ОБПФ, БПФ.

Технология FBMC (Filter Bank Multicarrier – гребенчатые фильтры с множеством несущих). Главная идея FBMC заключается в фильтрации модулированного сигнала на каждой поднесущей гребенчатым фильтром. Технология FBMC входит в число претендентов на применение в сетях 5G. 5G – это пятое поколение технологий мобильной связи с огромной скоростью передачи данных – несколько гигабит в секунду.

FBMC выделяется следующими преимуществами: сохранение ортогональности поднесущих, высокая частотная избирательность выходного фильтра, и как следствие низкое внеполосное излучение, увеличение эффективности использования частотно-временного ресурса из-за отсутствия циклического префикса.

Процесс модуляции и демодуляции FBMC реализуется с помощью БПФ и полифазной фильтрации. Структурные схемы передатчика и приемника представлены на рис. 1 и 2.

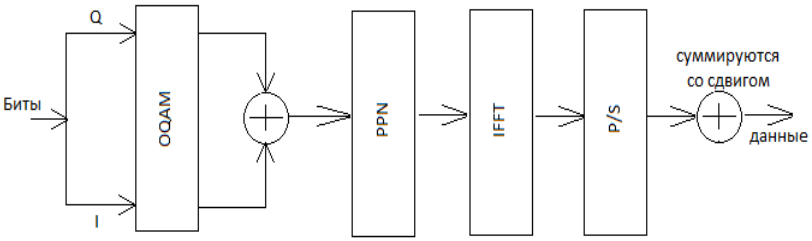


Рис. 1. Структурная схема передатчика FBMC

На данных схемах представлено формирование сигнала во временной области.

Рассмотрим реализацию банка фильтров. Система множества несущих описывается с помощью банка формирующих и согласованных фильтров, которые получены из исходного фильтра-прототипа ФНЧ сдвигами его частотной характеристики. На его основе формируются остальные фильтры.

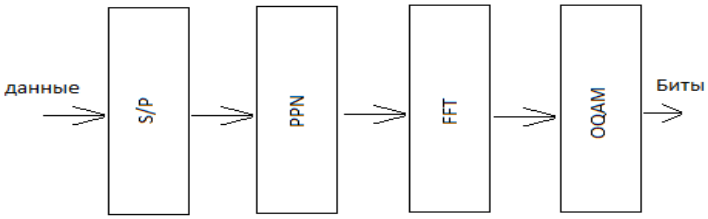


Рис. 2. Структурная схема приемника FBMC

Фильтр-прототип характеризуется коэффициентом *K* (коэффициент передискретизации), который определяет отношение длины импульсной характеристики фильтра к длине FBMC-символа. После фильтрации длительность символа увеличивается в *K* раз. Последовательность из сформированных *K*-компонент перекрывается во времени, поэтому данный коэффициент также называют фактором перекрытия. От коэффициента *K* зависит количество отсчетов в частотной области, добавленных между отсчетами ДПФ. В целом фильтр-прототип FBMC определяется следующими характеристиками: комплексная модуляция для увеличения спектральной эффективности, конечная импульсная характеристика для простоты проектирования и реализации, ортогональность.

Импульсная характеристика данного фильтра изображена на рис. 3.

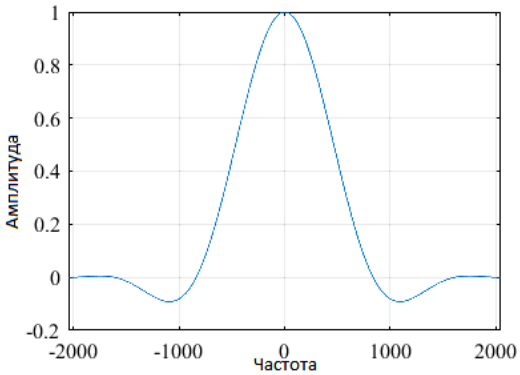


Рис. 3. Импульсная характеристика прототип-фильтра

Коэффициенты фильтра-прототипа заданы с использованием представления в закрытой форме, которое включает в себя только несколько настраиваемых параметров конструкции. Самый значимый параметр – длительность импульсной характеристики фильтра-прототипа, которая выражена в кратном количестве несущих. Этот параметр также называют фактором перекрытия *K*. Частотные коэффициенты фильтра-прототипа для фактора перекрытия *K* представлены в таблице.

Частотные коэффициенты фильтра для $K = 4$

K	h_0	h_1	h_2	h_3
4	1	0,971960	0,707106	0,235147

В FBMC используется OQAM-модуляция. Вообще может быть использованная любая, но используется OQAM, так как необходима максимальная спектральная эффективность. Созвездие OQAM-модуляции представлено на рис. 4.

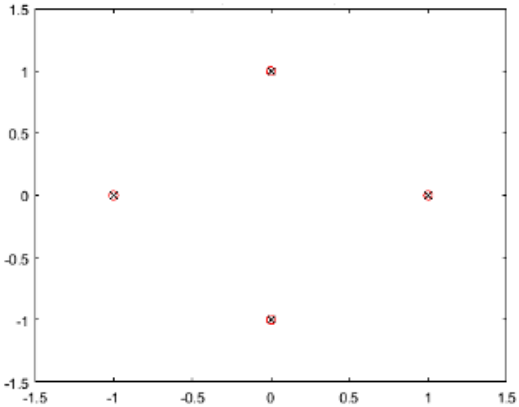


Рис. 4. Созвездие OQAM-модуляции

При формирования сигнала OQAM-символы QAM (c_{mn}) разделяются на две комплексные составляющие: вещественную часть a_{mn} и мнимую b_{mn}, причем мнимая часть сдвигается во времени на величину τ_0 относительно вещественной $\tau_0 = T_и/2$.

Сравнительный анализ OFDM и FBMC. На рис. 5 представлено сравнение спектров двух технологий.

Сравнивая графики спектров схем OFDM и FBMC, видно что FBMC имеет более низкие боковые лепестки. Это позволяет более эффективно использовать выделенный спектр, что приводит к увеличению спектральной эффективности.

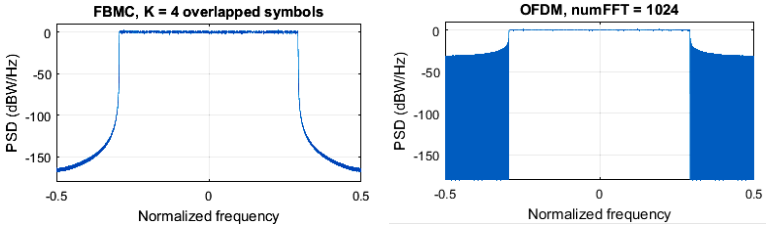


Рис. 5. Спектр сигналов FBMC и OFDM

Из результатов проделанной работы можно сделать вывод о том, что преимущество FBMC перед OFDM заключается в том, что у FBMC циклический префикс удаляется, что увеличивает спектральную эффективность. Уровень внеполосного излучения в случае FBMC значительно ниже, чем OFDM. Также FBMC более совершенная технология, чем OFDM, при увеличении количества используемых поднесущих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Покаместов Д.А., Крюков Я.В., Рогожников Е.В., Абенов Р.Р., Демидов А.Я. Концепция физического уровня систем связи пятого поколения // Изв. вузов. Радиоэлектроника / Национальный техн. ун-т Украины «Киевский политехнический институт». – 2017. – № 7 (661). – С. 367–382.

2. Francois Rottenberg FBMC/OQAM transceivers for 5G mobile communication systems // IEEE Xplore Author Details. – 2018. – Vol. 4, Is. 1. – P. 224–234.

УДК 654.026

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АУДИОКОДЕКА AMBE+2

Н.В. Познахарёв, студент

Научный руководитель А.Л. Федоренко, нач. отд. перспективных исследований и разработок

г. Томск, ООО «Элком+», FedorenkoAL@elcomplus.ru

Объектом исследования выступает аудиокодек AMBE+2, используемый в технологии DMR. С помощью специализированного программного комплекса для коррекции аудиофайлов была проведены действия по исправлению тестовых аудиофайлов, имеющих искажения по причине кодирования-декодирования через данный аудиокодек. Работа велась с использованием 5 аудиофайлов. После исправления искажений была проведена оценка качества речи с использованием двух методик: PESQ, MOS. Было выявлено, что в некоторых случаях слышимые улучшения в качестве речи пагубно влияют на баллы, выставленные программой.

Ключевые слова: AMBE+2, PESQ, MOS, вокодер, оценка качества речи, разборчивость речи, аудиокодек, кодек, уровень сигнала, помехи.

Повальная цифровизация и развитие на ее основе полезных сервисов все больше способствуют внедрению цифровых решений. Как и данные, голос также «ушел в цифру». Передача голоса в цифре играет большую роль в индустриальной структуре современных людей. Сейчас трудно себе представить современное производство, где не применяются передача голоса через «цифру» (IP-телефония, сотовые системы связи, цифровая радиосвязь, широкополосные системы и т.д.). Одним из приоритетных критериев выбора решения служит качество передаваемой речи. Это означает, что при выборе между двумя похожими решениями компания учитывает и восстановленный голос собеседника, что иногда даже может стать решающим фактором. На данном этапе работы были проведены эксперименты, используя аудиокодек AMBE+2 технологии DMR [1].

С целью улучшить качество воспроизведения, необходимо сравнивать различные варианты звучания голосовых радиопередач через разные технические решения, выбирая из них лучшие. При классическом методе оценки качества воспроизведения звуковых трактов (ЗТ) происходит прослушивание голоса специально обученным экспертом. Данный метод оценивания назван MOS (Mean Opinion Score) [2]. Это метод субъективной оценки качества речи. Так как распределение происходит по целому ряду характеристик, такой метод оценки имеет ряд недостатков, относящихся к человеческому фактору: высокая стоимость работы квалифицированного эксперта; ограниченное время проведения экспертиз вследствие усталости эксперта; сложность количественной оценки качества при малых различиях между тестовыми сигналами; разница между оценками у разных экспертов. Замена эксперта на комплекс аппаратно-программного обеспечения, данный метод называется PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), осуществляющего объективную оценку звучания с высокой корреляцией с субъективной экспертной оценкой, является экономически и практически обоснованной, что обусловливает актуальность работы [2].

Изучаемые методы объективной оценки качества воспроизведения звука позволяют проводить оперативный контроль качества акустического оборудования и достоверно оценивать эффект от изменений, вносимых в настройки ЗТ-устройств.

Тестовые аудиофайлы представляют запись фраз, прошедших через аудиокодек AMBE+2. Затем тестовые файлы были обработаны различными математическими фильтрами и подпрограммами в составе ПО с целью улучшения качества речи. Варианты обработки идентичны для каждого тестового файла с целью более точного сравнения.

Была произведена оценка качества полученных аудиофайлов при помощи методов PESQ и MOS.

Результаты проведенных оценок нескольких тестовых файлов приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Практические данные оценки методами PESQ и MOS тестового файла: «Карамель без шифрования»

№	Частота дискретизации, Гц	PESQ	MOS
1	8000	3,020	2,5
2	8000	3,019	3,5
3	8000	3,047	2,6
4	8000	2,950	2,9
5	8000	2,480	2,5

Таблица 2

Практические данные оценки методами PESQ и MOS тестового файла: «На границе зоны покрытия»

№	Частота дискретизации, Гц	PESQ	MOS
1	8000	3,496	3,6
2	8000	3,643	2,5
3	8000	3,346	3
4	8000	3,016	2,2
5	8000	2,361	2,6

В результате проведенной работы было выявлена закономерность реальных слышимых улучшений в тестовых аудиофайлах и ухудшения баллов при использовании автоматизированного ПО для оценивания качества речи. Так как после обработки файлов записи голоса для экспертов реальное звучание улучшается, а автоматизированная программа оценивания начинает срабатывать не корректно, потому что с точки зрения восприятия программы в записи внесли изменения, которые ей могут восприниматься как искажения аудиозаписи. К тому же оценку канала связи необходимо проводить с выключенной коррекцией по улучшению, так как оценки могут существенно разниться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровой кодек речи AMBE+2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://uc2k.ru/dmr/czifrovoj-kodek-rechi-ambe (дата обращения: 28.11.2019).

2. Methods for objective and subjective assessment of quality // МСЭ-Т P.800. International Telecommunication Union. – 1996. – P. 5–16.

УДК 621.376.9

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ ИМИТАТОР БЕСПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ В АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА

Л.Ю. Шейникова, магистрант

Научный руководитель А.С. Аникин, доцент каф. РТС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. РТС, lyubov.sheinikova@yandex.ru

Разработано программное обеспечение для приемного и передающего устройства на основе двух персональных компьютеров, образующих программно-аппаратный имитатор беспроводной цифровой линии связи. Оно имеет большое значение для развития лабораторной базы кафедры РТС и может быть применимо для разработки лабораторных макетов различного назначения, демонстрирующих принципы цифрового формирования и обработки сигналов.

Ключевые слова: программно-аппаратный имитатор беспроводной цифровой линии связи, модуляция, демодуляция, QPSK, MATLAB.

Для изучения студентами принципов модуляции и демодуляции сигналов систем связи, а также искажений сигналов в результате прохождения беспроводного канала связи могут быть использованы имитаторы [1].

В данной работе разрабатывался программно-аппаратный имитатор, который состоит из двух пунктов. Программное обеспечение первого пункта обеспечивает отображение передаваемой информации, выбор типа модуляции, длительность сигналов, параметры сигналов синхронизации, спектр излучаемого сигнала [2]. Программное обеспечение второго пункта обеспечивает отображение принятых данных, выбор типа модуляции, длительность сигналов, параметры сигналов синхронизации, спектр принимаемого сигнала, амплитудно-частотную характеристику беспроводного канала, битовую вероятность ошибки.

В качестве приемного и передающего оборудования используется ПК с установленным пакетом прикладных программ MATLAB. В качестве среды передачи был выбран акустический диапазон частот (от 20 Гц до 20 кГц). Передающий ПК оснащен устройством воспроизведения звука (динамиком), которое формирует акустическую волну, соответствующую излучаемому сигналу. Приемный ПК оснащен соответственно устройством записи звука (микрофоном).

Обобщенная структурная схема имитатора представлена на рис. 1.

В данной работе выбраны два типа модуляции: двоичная фазовая модуляция (BPSK) и квадратурная фазовая модуляция (QPSK).

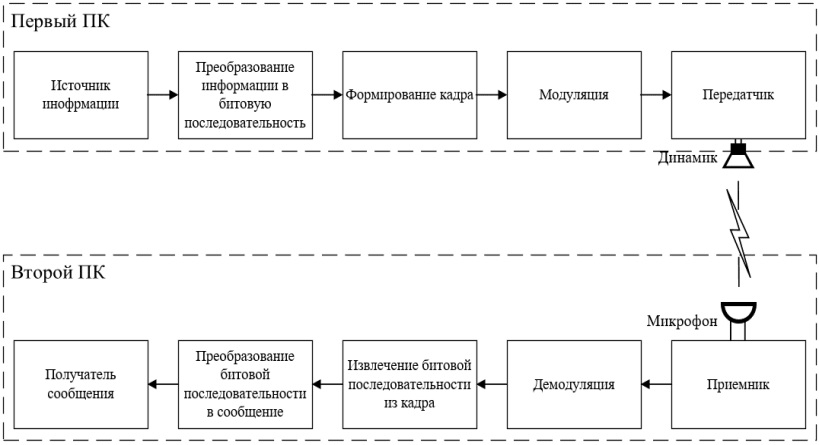


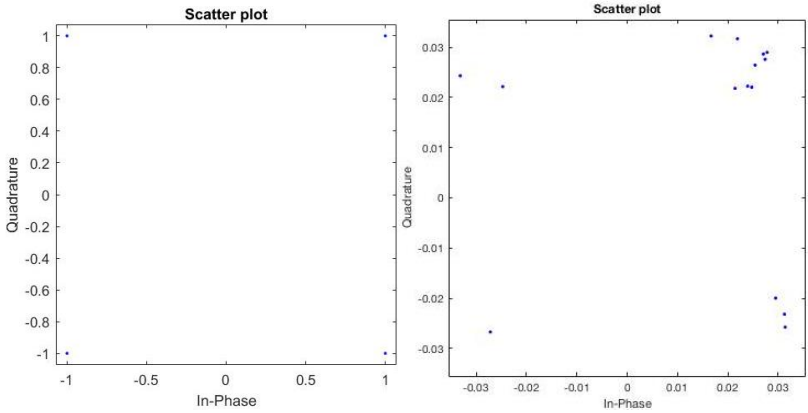
Рис. 1. Обобщенная структурная схема имитатора

Алгоритм работы программно-аппаратного комплекса состоит из следующих шагов. На стороне передатчика формируется информационная последовательность, которую необходимо передать. Далее в начале и конце сообщения добавляются преамбулы, необходимые для того, чтобы сигнал на приемной части можно было детектировать из всего принятого диапазона. Данная последовательность перемножается с сигналом несущей. Происходит излучение сигнала посредством динамика [3].

В программном обеспечении на приемном ПК вначале формируются согласованные фильтры для преамбул. Записанный сигнал пропускается через корреляционный фильтр и исходя из максимумов корреляционных функций, находится информационный сигнал. Затем полученный сигнал демодулируется.

Результат работы имитатора представлен на рис. 2. Слева (см. рис. 2, *а*) созвездие переданного QPSK-сигнала, а справа (см. рис. 2, *б*) – принятого. Разнос между приемным и передающим устройством составляет 3 м.

Исходя из рис. 2, можно сделать вывод, что данный программно-аппаратный имитатор беспроводной цифровой линии связи в акустическом диапазоне работает исправно. Разработанный имитатор можно применять для разработки лабораторных макетов различного назначения, демонстрирующих принципы цифрового формирования и обработки сигналов. В настоящее время ведется разработка программно-аппаратного имитатора беспроводной цифровой линии связи с применением OFDM-модуляции.



а *б*

Рис. 2. Созвездие переданного и принятого QPSK-сигнала соответственно

ЛИТЕРАТУРА

1. Имитатор сигналов ST121 [Электронный курс]. – Режим доступа: http://euraztech.ru/glavnaya/product/imitator-signalov-st121 (дата обращения: 03.02.2020).

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

3. Дьяконов В.П. Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК-Пресс, 2016. – 976 с.

УДК 621.396.677.73

РУПОРНАЯ Н-СЕКТОРИАЛЬНАЯ АНТЕННА ДИАПАЗОНА 25–35 ГГц

К.Е. Ткаченко, студент каф. ТОР; А.Л. Федоренко, нач. отд. перспективных исследований и разработок

г. Томск, Элком+, FedorenkoAL@elcomplus.ru

Представлены разработка, макетирование и экспериментальное исследование рупорной Н-секториальной антенны диапазона 25–35 ГГц. Расчеты антенны проводились в системе автоматизированного расчета Mathcad и были смоделированы в САПР Keysight Electromagnetic Professional.

Ключевые слова: рупорная Н-секториальная СВЧ-антенна, диаграмма направленности, моделирование антенны.

Антенны. В настоящее время антенны играют очень важную роль при решении многих практических задач, как организация радиосвязи, радионавигации, радионавигации и т.д. Антенно-фидерное устройство обеспечивает прием радиоволн и излучение, направлен-

ность действия в пространстве, все это является неотъемлемой частью радиотехнической системы. Различные допустимые размеры, технология производства и конструктивные решения антенн определяют ограничения, накладываемые на характеристики радиотехнических устройств: разрешающую способность, полосу пропускания, дальность действия.

Результаты работы. В работе были проведены геометрические расчеты антенны для получения значений: уровень боковых лепестков не более 10 дБ, ширина диаграммы направленности антенны не более 30°, диапазон рабочих частот 25–35 ГГц, коэффициент усиления антенны не менее 5 дБ (таблица).

Расчетные характеристики рупорной антенны

Наименование параметра рупорной антенны	Полученные результаты
Коэффициент направленного действия, дБ	7,292
Длина волны, м	0,01
Оптимальная длина и ширина раскрыва рупора, м	0,027
Размер оптимального *H*-секториального рупора, м	0.024
Эффективная площадь, м	0,0058

Диаграмма направленности антенны приведена на рис. 1.

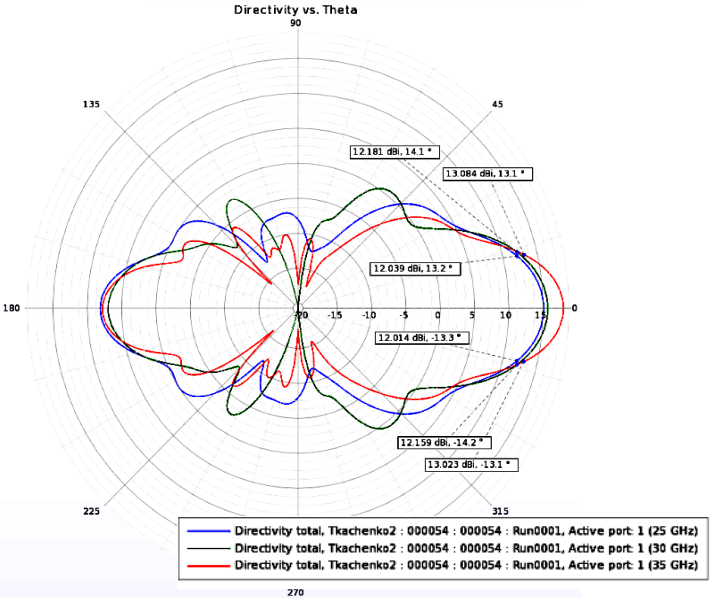


Рис. 1. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости

При получении теоретических расчетов, был произведен макет антенны приведен на рис. 2.

Рис. 2. Макет рупорной Н-секториальной антенны

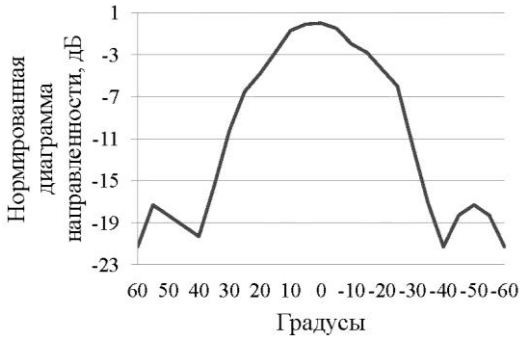


Рис. 3. Лиаграмма направленности

После построения графика диаграммы направленности, наблюдаем, что ее ширина составляет 30°, что соответствует техническому заданию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гошин Г.Г. Антенны: учеб. пособие [https://edu.tusur.ru/]. – Томск: ТУСУР, 2012. – 145 с.

2. Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. – Ч. 2: Антенны: учеб. пособие [https://edu.tusur.ru/]. – Томск: ТУСУР, 2012. – 159 с.

УДК 621.396.96

СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНИПУЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Н.А. Мельников, Т.В. Васильева, студенты каф. РТС
Научный руководитель В.А. Кологривов, доцент каф. РТС
г. Томск, ТУСУР, nikitka.32@yandex.ru

Приведены результаты модельного исследования систем передачи информации (СПИ) с использованием манипуляции параметров выше 2-го порядка. Построена и исследована модель передающей и приемной частей на основе изменения моментов высших порядков (асимметрия и эксцесс) случайных процессов в среде функционального моделирования Simulink системы MatLab. Проведен сравнительный анализ на помехоустойчивость полученной СПИ при изменении числа чипов, вписанных в один информационный бит.
Ключевые слова: шумоподобный сигнал, скрытность, энергетическая скрытность, асимметрия, эксцесс, передача, прием.

В настоящее время, в связи с большими объёмами сохраняемой и передаваемой информации, предъявляют жесткие требования к её безопасной передачи.

С целью повышения безопасности передачи информации используют различные виды скрытности. Различают пять основных видов скрытностей сигналов: энергетическую, структурную, пространственную, временную и информационную скрытности. В данной работе рассматриваем один из методов использования ПСП, который позволяет решить вопрос скрытности. Была рассмотрена технология, основанная на оперировании моментами выше 2-го порядка, такими как асимметрия и эксцесс, а дисперсия при этом остается неизменной.

На рис. 1 представлена модель системы передачи информации на основе шумоподобных сигналов с повышенной скрытностью.

Принцип работы схемы. В передатчике формируется случайный процесс с нормальным распределением, этот же процесс пропускается через нелинейную функцию, представленную на рис. 2, меняя тем самым значение эксцесса.

Коэффициенты преобразования подобраны таким образом, чтобы среднее значение и дисперсия, по которым чаще всего происходит прием сигнала, были одинаковы с нормальным процессом, различны только значения эксцесса. При поступлении на управляющий электрод информационного бита «единица» передается нормальный процесс с единичным эксцессом, в противном случае – с отличным от единицы эксцессом.

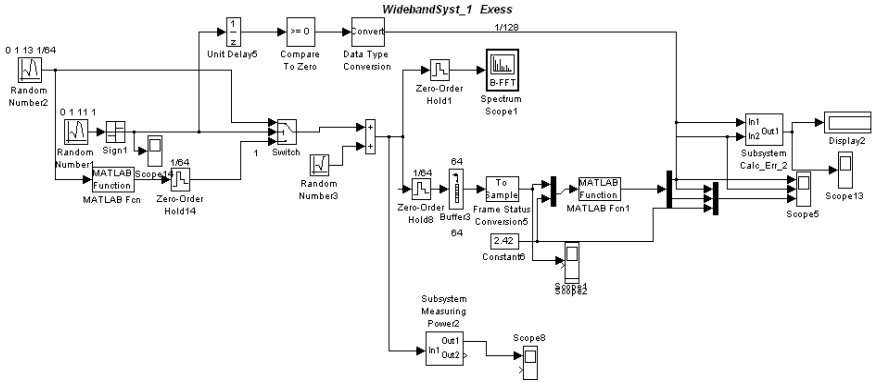


Рис. 1. Модель системы передачи информации
с числом отсчетов 64 или 128 чипов

```
function yt=exess_1(xt);
a=1; b=2;    %1 %1/2;
yt=a*xt+b*xt^3;
yt=yt/8.6;       %4.75    %2.81;
%%yt=0.3*xt+0.05*xt^3;
%%yt=2.13*yt;
```

Рис. 2. Функция, изменяющая эксцесс нормального процесса

На приемной стороне накапливаются отсчеты векторного типа, которые подвергаются следующей обработке (рис. 3:

```
function [w]=Def_Exess_1(x);
% function [w]=Def_Exess_1(x);
n=length(x)-1; th=x(n+1);
x=x(1:n); x0=1.0;
for dx=[0.5]
    xmin=x0-dx; xmax=x0+2*dx; s=0; st=0; m=0; %
    for i=1:n
        xt=abs(x(i));
        if  (xt >= xmin) & (xt <= xmax); st=st+xt; m=m+1; end;
    end;
    if st>s; s=st; end;
end;
s=s*m/n;
sr=sum(x)/n;
d=sum((x-sr).^2)/n; if d<1e-6; d=1; end;
ex=sum((x-sr).^4)/n/d^2; if ex<1e-6; ex=1; end;
z=s/ex;
if z>th;  y=1; else y=0; end;
w=[y,z];
```

Рис. 3. Реализация алгоритма приема

Для реализации алгоритма приема вычисляем усеченное среднее значение с помощью выбора интервала амплитуд. Запоминаем n отсчетов случайного процесса, по которым определяем значение эксцесса. С помощью цикла «for» задаем интервалы положительных и отрицательных значений. Первый интервал [0,5; 2] и второй интервал [–2; –0,5]. Далее с помощью условного оператора «If…else» накапливаем число отсчетов (m) и суммируем их. По формуле $S_r = S \times m/n$ находим усеченное среднее значение. После этого вычисляем среднее значение, дисперсию и эксцесс. В качестве параметра для принятия решения выбираем отношение усеченного среднего значения к эксцессу. Это значение сравнивается с порогом и в зависимости от этого, принимается решение о приеме 0 или 1. Детектор ошибок сравнивает принятые значения с передаваемым потоком, и количество несовпадений отображается в блоке «Display».

Приведем результаты исследования, как на требуемое соотношение сигнал/шум будет влиять число чипов, вписанных в каждый информационный бит. Так, значение SNR при P_b =0,002 составило 10 дБ.

Модельное исследование подтвердило продуктивность используемого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парфенов В.И., Сергеева Е.В. Применение дискриминантной процедуры при синтезе и анализе телекоммуникационных систем. – 2003. – С. 92–96.

УДК 621.396.41

ШУМОВАЯ СИСТЕМА РАДИОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗАДЕРЖАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ

Т.В. Васильева, Н.А. Мельников, студенты каф. РТС

Научный руководитель В.А. Кологривов, доцент каф. РТС

г. Томск, ТУСУР, tulpan1997@outlook.com

Рассмотрен метод передачи, основанный на интерференции шумового сигнала и задержанного шумового сигнала, модулированного в соответствии с определенным информационным битом. Приведены значения отношения сигнал/шум (SNR), полученные в результате моделирования в среде Simulink.

Ключевые слова: шумоподобный сигнал, биты, некогерентная интерференция, скрытность, корреляционная обработка, передатчик, приемник.

В настоящий момент времени рассматриваются не только вопросы быстродействия и помехоустойчивости систем передачи, но и вопросы безопасности передаваемой информации.

В работе рассматривается один из подходов повышения скрытности сигнала, который был представлен в [1]. Он заключается в сложении (интерференции) шумового сигнала с информационным задержанным шумовым сигналом. На рис. 1 представлена модель модема на основе интерференции задержанных информационных символов.

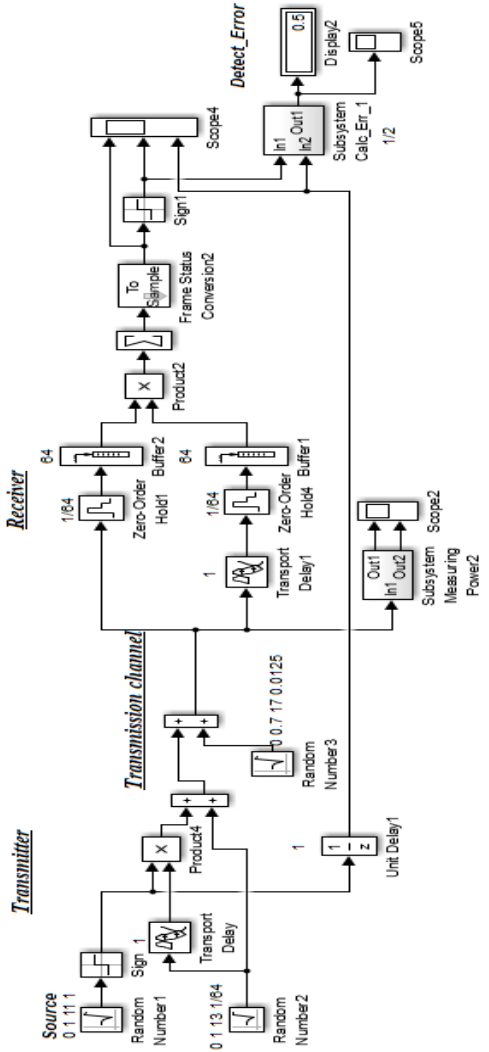


Рис. 1. Модель модема на основе интерференции задержанных информационных символов

На передающей стороне формируется два шумоподобных сигнала. Один из них задерживается на время, значительно превышающее время когерентности (в данном случае используется время длительности бита) и далее модулируется в соответствии с текущим битом. При приходе «1» последовательность остается неизменной, при «0» – инвертируется. Задержанные шумовые символы, несущие информацию, суммируются с исходным шумовым сигналом и поступают в канал радиопередачи. Таким образом, передача осуществляется путем некогерентной интерференции [2] – сложения или вычитания соседних интервалов шумовой последовательности. Алгоритм такой передачи можно представить следующим образом (1):

$$y_1 = x_2 \pm x_1, \quad y_2 = x_3 \pm x_2, \quad y_3 = x_4 \pm x_3, \quad \ldots, \quad y_n = x_{n+1} \pm x_n, \qquad (1)$$

где y_n – это последовательность на выходе передатчика, соответствующая n-му биту; x_{n+1} – это фрагмент текущей шумовой последовательности; x_n – это фрагмент задержанной шумовой последовательности, знак которой зависит от информационного бита.

На рис. 2 представлены диаграммы формирования сигнала в передатчике.

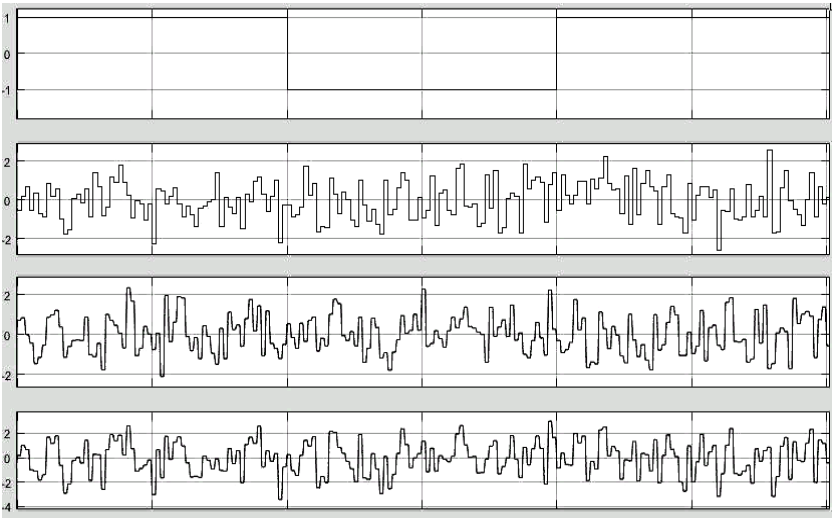


Рис. 2. Формирование сигнала в передатчике: *1* – информационные биты; *2* – исходный шумовой сигнал (x_{n+1}); *3* – задержанные информационные символы (x_n); *4* – символы на выходе передатчика (y_n)

Как видно из графиков, представленных выше, при передаче «0» задержанный шумовой сигнал подвергается инверсии.

Прием данных осуществляется путем взаимной корреляции соседних интервалов интерферированной псевдослучайной последовательности. Опишем алгоритм приема:

$$(y_1, y_2) = (x_2 \pm x_1, x_3 \pm x_2); \quad (y_2, y_3) = (x_3 \pm x_2, x_4 \pm x_3);$$
$$\ldots, \quad (y_{n-1}, y_n) = (x_n \pm x_{n-1}, x_{n+1} \pm x_n). \qquad (2)$$

По приведенному алгоритму (2) видно, что при обработке последовательностей y_1 и y_2 будут коррелировать составляющие x_2, при обработке y_2 и $y_3 - x_3$ и т.д. Поэтому при приеме «1» будет наблюдаться положительный пик, а при приеме «0» – отрицательный.

Были проведены измерения SNR на входе приемника при количестве случайных отсчетов за время передачи одного информационного бита $m_1 = 64$ и $m_2 = 128$. Значения были получены при вероятности появления битовой ошибки, равной 1/1000.

$$SNR_{64} = 4{,}67 \text{ дБ}; \quad SNR_{128} = 1{,}59 \text{ дБ}.$$

Выводы. Было проведено моделирование модема в среде Simulink на основе интерференции задержанных информационных символов. Исследованный метод обеспечивает хорошую скрытность передачи данных и обладает неплохой помехоустойчивостью, что свидетельствует о перспективности данного направления. Для достижения лучших показателей SNR можно увеличить длину шумовой последовательности, но для этого требуется более быстрая элементная база.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В.И. Шумовая система радиосвязи на основе интерференции задержанных информационных сигналов // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/apr17/1/text.pdf (дата обращения: 18.02.2020).

2. Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т., Горшенков А.А. Явление некогерентной интерференции сигналов // Омский научный вестник. – 2010. – № 2 (90). – С. 163–168.

УДК 681.5.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

У.С. Жармухамбетова, магистрант;
А.И. Арзамасцев, инж. каф. ТОР
Научный руководитель А.В. Пуговкин, д.т.н., проф. каф. ТОР
г. Томск, ТУСУР, pugovkinav@ngs.ru

Большое внимание уделяется энергоэффективности зданий. Одним из ее компонентов является теплозащита с помощью внешних ограждений. В современной практике уровень теплозащиты задается с помощью нормативных актов, что на практике не всегда вы-

полняется. Телевизионная сьемка широко используется, но количественные данных об уровнях теплозащиты не дает. Для решения этой проблемы нами предложен и реализован метод определения качества теплозащиты здания в автоматизированном режиме.
Ключевые слова: энергоэффективность, теплозащита, коэффициент теплоотдачи, тепловая энергия, температура помещения.

Теплоснабжение является одной из основных задач для энергообеспечения зданий. При этом качества теплозащиты зданий, не удается измерить в системных физических единицах [1]. Телевизионная съемка обеспечивает качественный контроль теплозащиты здании, но не может давать количественную оценку теплопотерь. Решение этой проблемы позволит осуществить сравнительную оценку жилых и производственных зданий, выработать рекомендации по снижению тепловых потерь [2]. Нами предложен метод оценки качества теплозащиты зданий. Суть метода заключается в следующем. В стационарном режиме коэффициент теплоотдачи здания можно представить в виде.

$$G = P/(T - T_{\text{нар}}), \quad (1)$$

где P – тепловая мощность, потребляемая зданием, T – средняя температура здания, $T_{\text{нар}}$ – температура наружной среды.

Для проведения анализа был выбран двухподъездный четырёхэтажный дом. Материал стен – силикатный кирпич, фасад утеплён минераловатной плитой и закрыт сайдингом. P-входную тепловую мощность определяют по показаниям общедомового теплосчетчика, T – средняя температура здания находится усреднением показаний нескольких температурных датчиков. При отсутствии таких данных по зданию можно взять комфортную температуру, например 23°, $T_{\text{нар}}$ – берется из архива Гидрометцентра Томской области. По дому есть данные общедомовых теплосчётчиков со значениями, снимаемым раз в сутки с 1 декабря 2013 г. до 27 марта 2018 г. Были проанализированы два отопительных сезона: 2014/15, 2016/17 гг. Результаты обработки данных представлены в виде графика зависимости коэффициента теплоотдачи G от температурного напора ($T - T_{\text{нар}}$) (рис. 1).

Анализ этой зависимости позволяет выделить 3 участка. Участок 1 носит аномальный характер, когда при малых ΔT коэффициент G максимален. С ростом ΔT на этом участке коэффициент G уменьшается. Это явление можно объяснить перерасходом тепловой энергии в осенний и весенний периоды. Участок 2 соответствует основному периоду отопления (декабрь, январь, февраль), на этом участке коэффициент G изменяется незначительно. На 3-м участке наблюдается увеличение G с ростом температурного напора, это можно объяснить естественной конвекцией через внешнее ограждение.

Рис. 1. Сравнение отопительных сезонов 2014/15, 2016/17 гг.

Рассмотрим влияние средней температуры здания на полученные ранее результаты. для этого проведем расчеты, когда T = 22, 23, 24 градуса. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

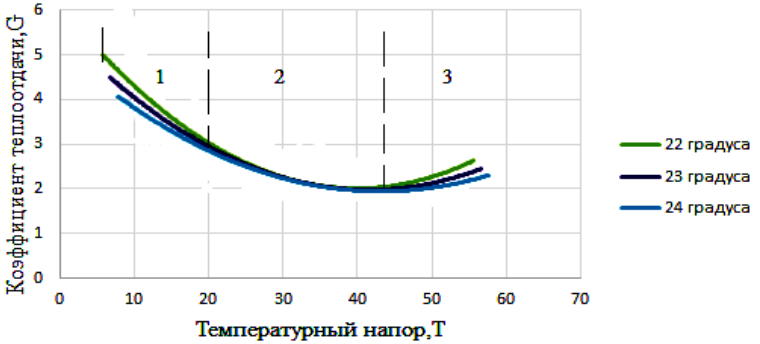


Рис. 2. Влияния температуры здания
на коэффициент теплоотдачи 2016/17 г.

Из рис. 2 видно, что на участке 2 коэффициент G не зависит от температуры здания. Это подтверждает правильность выбора средней температуры T в 23 градуса. На участках 1 и 3 – расходятся. Поэтому для сравнительного анализа различных зданий надо пользоваться 2-м участком. Для подтверждения предположения о влиянии перетопа на характер поведения функции G для 1-го участка были проведены расчеты. Для отопительного сезона 2016/17 г. при расчетах были исключены данные за октябрь, апрель, май. Результаты расчёта приведены на рис. 3.

Из рисунка видно, что на участке 1 произошли значительные изменения, тем самым выявили, что аномальный характер температурной зависимости исчез, что и требовалось доказать.

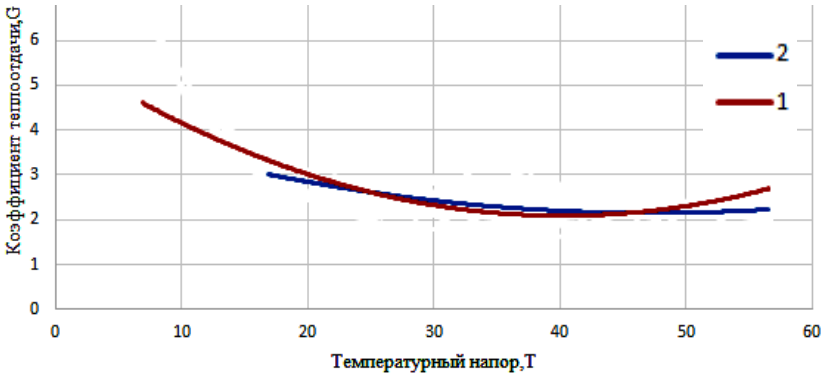


Рис. 3. Исключение осеннего и весеннего периодов: *1* – полный отопительный сезон 2016–2017 г.; *2* – часть отопительного сезона 2016– 2017 г.

Достоинствами предлагаемого метода являются:

– количественная оценка энергоэффективности теплозащиты зданий;

– определение времени и объемов перерасхода тепловой энергии (перетопы);

– возможность оценки степени деградации теплозащиты внешних ограждений;

– возможность анализа качества теплозащиты в течение отопительного сезона;

– сравнительный анализ качества теплозащиты различных зданий и сооружений между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуговкин А.В., Муслимова Н.И., Купреков С.В. Автоматизация мониторинга и управления теплоснабжением зданий и помещений: – Томск : ТУСУР, 2013. – 291 с.

2. Пуговкин А.В., Зорин П.А., Купреков С.В и др. Контроль энергоэффективности теплоснабжения зданий типовой застройки // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск, ТУСУР, 2018. – Ч. 1-2. – С. 302–305.

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

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

УДК 372.862

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТА НА ОСНОВЕ КАМЕРЫ PIXY CMUCAM5

А.А. Изюмов, ассистент;
А.А. Карпешкина, Р.В. Саблин, М.Д. Жумабек, студенты
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, kvp@kcup.tusur.ru

Описана система машинного зрения на базе камеры Pixy CMUcam5 и микроконтроллера Arduino.
Ключевые слова: машинное зрение, распознавание образов, камера.

Человек по визуальному каналу получает более 60% всей информации, регулирующей его взаимодействие с внешней средой. Это же справедливо и для искусственных сенсорных систем: те из них, которые используют визуальную информацию, обладают наибольшей информативностью. Особое место занимают системы технического зрения, относящиеся к группе бесконтактных пассивных информационных средств [1]. Системы технического зрения (СТЗ) – это специальное сенсорное устройство, позволяющее получать качественные изображения с их последующей обработкой и преобразованием [2].

Среди систем СТЗ следует отметить TrackingCam, который производится в России, имеет матрицу Omni Vision 7725 с разрешением 640×480 пикселей, кадровую частоту до 30 fps, процессор STM32f407 – ARM Cortex M4 168 МГц, ОЗУ 168 Кбайт, флеш-память 512 Кбайт, напряжение питания 5–12 В, поддерживает интерфейсы I2C, UART, SPI, Dynamixel, USB [3].

Другим методом реализации машинного зрения является плата Pixy CMUcam5. Данная плата состоит из цифровой камеры и собственного процессора, отвечающего за обработку и анализ видеоизображения. Встроенные алгоритмы камеры способны обнаруживать и отслеживать сотни объектов одновременно.

Основным назначением камеры является использование в качестве датчика в системах Lego Mindstorms, но плата также поддерживает многие одноплатные контроллеры, такие как Raspberry Pi

BeagleBone Black. Работа с контроллерами требует использования специальных открытых библиотек и особого подключения.

Технические характеристики модуля приведены в таблице.

Технические характеристики Pixy CMUcam5

Процессор	NXP LPC4330, 204 MHz, dual core
Оптическая матрица	Omnivision OV9715, 1/4", 1280×800
Поле зрения линзы	75° – по горизонтали, 47° – по вертикали
Тип линзы	standard M12
Энергопотребление	140 мА
Питание	USB (5 В), 6–10 В
Оперативная память	264 кБ
Флэш-память	1 мБ
Интерфейсы	UART serial, SPI, I2C, USB, digital, analog
Габариты	2,1×2,0×1,4 дюйм (5,3×5,08×3,55 см)
Масса	27 г

В стандартной комплектации камера Pixy CMUcam5 поставляется только с кабелем, предназначенным для работы с Lego Mindstorms. Для работы с Arduino Mega 2560 необходимо подключить камеру, используя SPI.

В отличие от стандартного последовательного порта (англ. standard serial port), SPI является синхронным интерфейсом, в котором любая передача синхронизирована с общим тактовым сигналом, генерируемым ведущим устройством (процессором). Принимающая (ведомая) периферия синхронизирует получение битовой последовательности с тактовым сигналом. К одному последовательному периферийному интерфейсу ведущего устройства-микросхемы может присоединяться несколько микросхем. Ведущее устройство выбирает ведомое для передачи, активируя сигнал «выбор кристалла» (англ. chip select) на ведомой микросхеме. В SPI используются четыре цифровых сигнала [4].

Для подключения и работы с камерой с использованием интерфейса SPI необходимо подключение к программе стандартной библиотеки <SPI.h>. Для получения данных обработанного видео, типа, положения и количества объектов используется библиотека алгоритмов работы с камерой Pixy – <Pixy.h>.

В проекте по управлению роботом-манипулятором используется принцип машинного зрения, основанный на обработке аналогового сигнала, поступающего с камеры. Из-за высоких требований к размеру и скорости считывания изображения был реализован следующий подход: черно-белое изображение снимается цифровым входом, сиг-

нал на который подаётся с выхода компаратора. Программное обеспечение позволяет представить данные, полученные путем обработки видеосигнала в текстовом виде, используя «пробел» для обозначения светлых фрагментов изображения и «#» для темных. Полученные данные обрабатывались и использовались для управления роботом, основной функцией которого являлось следование за объектом [5].

Pixymon – проприетарная утилита, основной функцией которой является здание характеристик и имен отслеживаемых объектов для передачи плате Pixy CMUcam5. Пример задания объекта через утилиту Pixymon приведен на рис. 1.

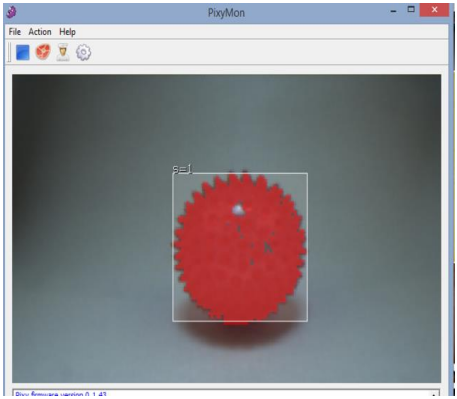


Рис. 1. Пример задания объекта через утилиту

Основным недостатком данного метода является низкий функционал робота. Черно-белое изображение не позволяет распознавать объекты на цветном фоне, а обработка видеосигнала при помощи только Arduino накладывает ограничения из-за малого объема памяти и вычислительной мощности при реализации остальных функций робота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 348 с.

2. Особенности и преимущества системы технического зрения [Электронный ресурс]. – https://techtrends.ru/resources/articles/sistemy-tekhnicheskogo-zreniya-osobennosti-i-preimushchestva (дата обращения: 10.02.2020).

3. Шабалин Е.Д., Шандаров Е.С. Система технического зрения на базе Trackingcam // Научная сессия ТУСУР–2018. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 138–140.

4. Болл Стюарт Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. – М.: Додэка-XXI, 2007. – 360 с.

5. Eyeduino – техническое зрение на Ардуино [Электронный ресурс]. – URL: http://blog.amperka.ru/eyeduino (дата обращения: 10.02.2020).

УДК 372.862

ОБУЧЕНИЕ РОБОТЕХНИКЕ ОТ LEGO ДО ARDUINO

Ю.А. Поярков, А.А. Супин, Л.В. Ципилев, студенты каф. КСУП

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

г. Томск, ТУСУР, kvp@kcup.tusur.ru

Описывается вариант обучения создания робототехнических платформ на базе Arduino, а также приведена сравнительная характеристика с готовыми платформами на базе Lego.

Ключевые слова: робототехническая система, Lego, Arduino, робот, автоматизированные системы управления.

Робот – автоматическое устройство, спроектированное по принципу живого организма. Действуя в соответствии с заложенным в него алгоритмом (программой) и получая информацию о внешнем мире со своих датчиков, робот самостоятельно выполняет различные операции. При этом робот может как управляться оператором, так и действовать автономно.

Робототехническая система (РТС) – совокупность роботов, автоматических и/или автоматизированных устройств, информационно и функционально связанных между собой в единое целое.

Потенциал применения робототехнических систем практически безграничен. Им доверяют жизни людей в военных, спасательных или медицинских операциях, от их правильного функционирования зависят производство на предприятиях, точность полученных научных данных и т.д. Также роботы используются и в различного рода развлечениях, игрушках, рекламных стендах.

Во многих странах широко распространено обучение конструированию в школах и колледжах с использованием наборов LEGO Mindstorms. С развитием этого опыта стали популярны соревнования роботов. Наборы LEGO Mindstorms комплектуются набором стандартных деталей LEGO (балки, оси, колеса, шестерни, сервомоторы) и набором, состоящим из сенсоров, двигателей и программируемого блока. Наборы делятся на базовый и ресурсный.

Основной фактор, влияющий на конечную стоимость любой робототехнической системы, – стоимость аппаратного обеспечения. Стоимость существующих готовых наборов по робототехнике значи-

тельно превышает стоимость компонентов робототехнических макетов, созданных на базе Arduino.

Arduino – платформа электроники с открытым исходным кодом, основанная на простом в использовании аппаратном и программном обеспечении. Для этого используется язык программирования Arduino и программное обеспечение Arduino (IDE), для написания программ, их компиляции и программирования. Аппаратная часть состоит из набора смонтированных печатных плат. Сторонними производителями выпускаются наборы робототехнической электромеханики, ориентированной на работу совместно с платами Arduino.

Главная особенность Arduino в том, что совместимые платы спроектированы так, что их можно при необходимости расширять, добавляя в устройство новые компоненты.

Рассмотрим типовую схему робототехнической платформы, представленной на рис. 1. На основе схемы можно изучать основные принципы функционирования автоматических систем.

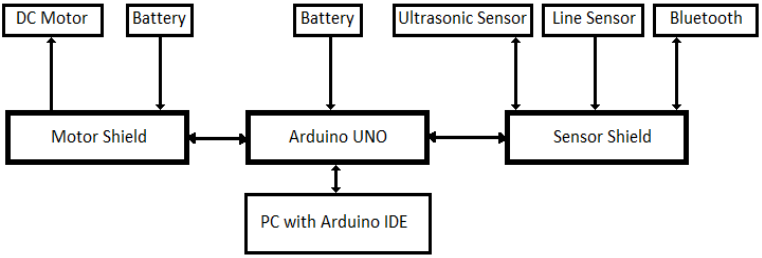


Рис. 1. Структура робота

Особенностью обучения на работающей робототехнической платформе Arduino является более эффектная визуализация, которая в свою очередь должна обеспечить хорошее качество усвоения материала и желание узнавать все больше и больше. Процесс обучения включает в себя знание таких предметов, как механика, теория автоматического управления, схемотехника, программирование, микропроцессорные устройства.

В структуру робота могут включаться различного рода сенсоры и датчики:

1. Контактные датчики. Кнопка / контактный выключатель.
2. Дистанционные датчики. Ультразвуковые датчики, инфракрасные датчики, лазер.
3. Оптические датчики.
4. Датчики позиционирования.

5. Температурные датчики.

6. Датчики измерения влажности и др.

Готовые комплекты от компании Lego и др., а также подобная схеме робототехническая платформа, разработанная на базе Arduino, значительно различаются по стоимости. В таблице приведено сравнение цен.

Сравнение цен

Элементы/комплект сборки	Стоимость элементов, руб.	
	Платформа на базе Arduino	Lego Mindstorm (NXT\EV3)
Сервопривод	250	3050
Контроллер	700	23630
Контроллер серводвигателей	75/150	*
Bluetooth модуль	150	*
Рука-манипулятор	3500	**
Платформа	6000	**
Электродвигатель 12–24 В	*	2470
Элементы питания	750	–
Итоговая стоимость	14000	24000

* – встроенный;

** – собирается из деталей, входящих в комплект.

Робототехническая платформа, разрабатываемая на базе платы Arduino, в основном будет состоять из металлических деталей, в отличие от готовых решений, где основные компоненты изготовлены из пластмассы. Это даёт большой запас прочности для дальнейшего использования. Применение электродвигателей постоянного тока в качестве элементов, отвечающих за движение платформы, повышает мобильность и скорость при значительно меньшей по отношению к аналогам стоимости робототехнической платформы. Меньшая себестоимость позволяет получить большее количество робототехнических платформ, которые могут послужить в качестве стендов для обучения студентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестеров И.А. Робототехническая платформа с механическим манипулятором на базе Arduino MEGA 2560 // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР, Томск, 16–18 мая 2018 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 141–145.

2. Поярков Ю.А., Супин А.А., Шурыгин Ю.А. Экономическое обоснование проекта ГПО КСУП-1801 «Экстремальная робототехника» // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск 28–30 ноября 2018. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 2. – С. 201–202.

3. Техническая информация о плате Arduino [Электронный ресурс]. – URL: https://arduinomaster.ru/platy-arduino/plata-arduino-mega-2560/ (дата обращения: 02.02.2020).

4. Техническая информация о плате управления моторами постоянного тока [Электронный ресурс]. – URL: http://www.14core.com/wiring-and-controlling-the-l293d-arduino-unomega-shield/ (дата обращения: 04.02.2020).

5. Техническая информация о плате контроля сервоприводами [Электронный ресурс]. – URL: https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver?view=all (дата обращения: 04.02.2020).

6. Комплектующие для Lego [Электронный ресурс]. – URL: https://robotbaza.ru/collection/komplektuyuschie-2 (дата обращения: 05.02.2020).

УДК 53.08

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО ТРУБОПРОВОДА

А.С. Сарсенбаев, Н.М. Зальцман, студенты

Научный руководитель А.А. Солдатов, доцент каф. УИ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Sarasenbev93@mail.ru, nikitazaltsman@gmail.com

Описываются робототехнические комплексы контроля качества сварных швов нефтегазового трубопровода, преимущества и недостатки методов контроля качества сварных соединений. Представлен результат проведённого патентного поиска по автоматизированным и роботизированным комплексам в виде графика.

Ключевые слова: трубопровод, контроль, ультразвук, комплекс.

Одной из задач робототехнического комплекса контроля качества сварных швов является система распознавания сварного шва для дальнейшего корректирования движения и произведения ультразвукового контроля. Принято решение производить обнаружение сварного шва, внедрив систему технического зрения. Разработана блок-схема, в которой представлены все модули и их взаимодействие данная, схема представлена на рис. 1.

Внедрение технического зрения – это не только установка камеры, а также постройка алгоритма распознавания. Важно подобрать алгоритм для распознавания линии, который будет устойчив к зашумлениям, вызванным окружающей средой (трубопровод находится на открытом воздухе), к которым можно отнести: слабую освещённость, возможную затуманенность, также он должен быть устойчив к тому, что шов может быть сильно зачищен и линия перехода со шва к трубе будет очень слабо проявлена.

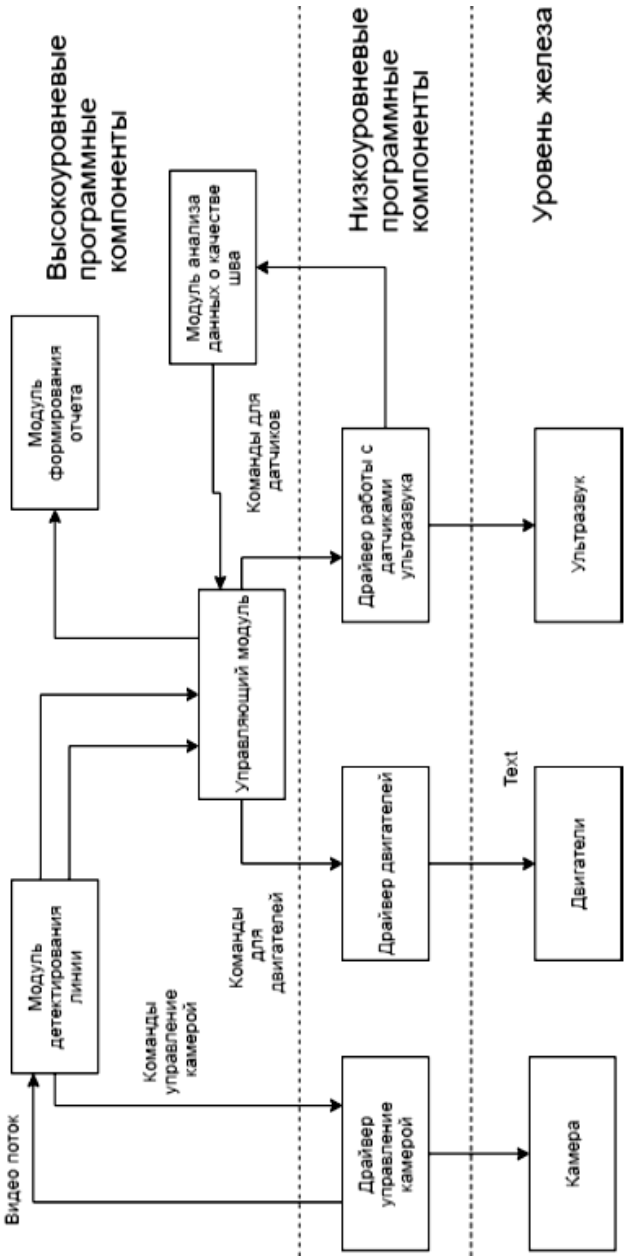


Рис. 1. Блок-схема разрабатываемого комплекса

Также к алгоритму есть требования по производительности, данный алгоритм будет работать на raspberry pi, следовательно, есть ограничения по вычислительным мощностям.

Рассматриваемые методы для детектирования линии условно можно разделить на две группы:

- методы на основе использования компонента градиента яркости;
- методы, построенные на использовании нейронных сетей.

Из первой группы выделены следующие алгоритмы: детектор Кэнни, преобразование Хафа и преобразование Радонна.

Из группы алгоритмов, построенных на базе нейронных сетей, выделены следующие: R-CNN, Faster-CNN, YOLO – это самые распространённые технологии, которые используют для решения задачи распознавания образов.

Детектор Кэнни. К недостаткам данного алгоритма относится сложность вычисления, алгоритм требует большой вычислительной мощности для потоковой обработки. Однако для уменьшения вычислительных затрат изображение можно преобразовывать в оттенки серого, эти действия выполняются непосредственно перед применением детектора, следовательно, это позволяет использовать данный алгоритм в условиях ограниченной вычислительной мощности [1].

Преобразование Хафа. К недостаткам следует отнести необходимость проведения операции нахождения контуров, поиска областей пересечения траекторий отдельных точек в многомерном пространстве параметров и необходимость дополнительных алгоритмов для локализации отрезков на найденных прямых линиях [2].

Сверточные нейронные сети. Сравнивая сверточные нейронные сети, составлена таблица. Результаты представлены для наглядного сравнения. В табл. 1 приведены результаты R-CNN, Fast R-CNN и Faster-CNN.

Таблица 1

Сравнительные характеристики R-CNN

	R-CNN	Fast R-CNN	Faster R-CNN
Время теста на изображение	50 с	2 с	0.2 с
Ускорение	1×	25×	250×
mAP (VOC 2007)	66,0	66,9	66,9

В конце 2015 г. был представлен алгоритм YOLO (You Only Look Once), который позволяет производить быструю обработку изображений (порядка в 1000 раз быстрее, чем R-CNN и в 100 раз быстрее, чем Fast R-CNN), но с более низкой точностью [3] (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные характеристики YOLO и R-CNN

Алгоритмы	Тест	mAP	FPS
Faster R-CNN VGG-16	Тест VOC2007	73,2	7
YOLOv2 416x416	Тест VOC2007	76,8	59
YOLO	Тест VOC2007	63,4	45

Заключение. Подводя итоги обзора технологий, которые можно использовать для распознавания линии, можно выделить две оптимальные технологии.

Это детектор Кэнни из группы методов, основанных на использовании компонента градиента яркости, детектор Кэнни считается одним из лучших детекторов, который не требует больших вычислительных мощностей, а также устойчив к зашумлениям, данный метод часто применяют для выделения границ на медицинских изображениях.

Также для дальнейшего анализа выбрана YOLO Tiny, которая оптимизирована на работу на устройстве с ограниченными ресурсами и которую часто применяют для распознавания образов в потоковом видео.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка изображения – детектор границ Кэнни [Электронный ресурс]. – http://robocraft.ru/blog/computervision/484.html (дата обращения: 11.2.2020).

2. Ершов Е.И. О точной оценке неточностей аппроксимации прямых в алгоритме быстрого преобразования Хафа // ИТиС. – 2015. – С. 858–868.

3. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. – https://arxiv.org/pdf/1612.08242 (дата обращения: 27.2.2020).

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 621.372

НОВЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ASYMH EXTENDED И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ТЕСТОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга, Р.А. Калменов
Научный руководитель А.Н. Сычев, проф. каф. КСУП, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ans@main.tusur.ru
Проект ГПО КСУП-1902 «Моделирование пассивных компонентов СВЧ-устройств»

Проводится тестирование программного продукта AsymH Extended в целях проверки на соответствие выходных параметров с эталонными значениями. Рассмотрено несколько вариантов построения графиков частотных характеристик с изначально заданными входными данными. Осуществлен импорт рассчитанных данных в формате Touchstone для анализа и дальнейшего их использования.
Ключевые слова: несимметричные связанные линии, программный продукт AsymH Extended, АЧХ, ФЧХ, S-параметры.

Ранее на предварительном этапе авторами была разработана программа AsymH [1], предназначенная для моделирования несимметричных СЛ с однородным диэлектриком, используемых при построении направленных ответвителей, совмещённых с трансформаторами импеданса [2], и т.п. В данной работе исходная программа была дополнена модулем расчета частотного отклика отрезка СЛ, расширена еще одним окном графического интерфейса пользователя и получила название AsymH extended. Новые функциональные возможности заключаются в следующем:

1. Выбор одной из трёх схем на отрезке СЛ, подлежащих анализу: а) общая схема с произвольными нагрузками на портах; б) схема межлинейного трансформатора с одинаковыми нагрузками на концах каждой из линий; в) межпортовый трансформатор с режимом холостого хода на концах одной из диагоналей и нагрузками в другой.

2. Ввод требуемых значений параметров нагрузок на портах анализируемых схем.

3. Задание длины отрезка СЛ, а также начальной и конечной частот диапазона анализа (при этом число частотных точек фиксировано).

4. Расчет параметров рассеяния отрезка СЛ (комплексной матрицы S-параметров) в заданном частотном диапазоне. Построение графиков амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ, ФЧХ) с возможностью выбора конкретных зависимостей S-параметров из десяти возможных

Состав и реализация программного продукта AsymH Extended. Данный программный продукт разрабатывался в среде разработки Microsoft Visual Studio 2017 на языке программирования C#. Функциональные расширения осуществлены за счет использования двуязыкового программирования. Расчетная часть реализована на C++ и сформирована в dll-файл. Dll-файл был подключен к изначальному C#-проекту с использованием маршалинга. Помимо того, AsymH extended использует компонент для рисования графиков ZedGraph, который был подключен также в виде dll-файла.

Тестирование. Для верификации и тестирования программного продукта будут использованы данные, взятые из статьи [3], необходимая часть из которых приводится в таблице.

Численные значения параметров связанных линий

Группы параметров	Параметры	Значения параметров		
Погонные	L_{11}, мкГн/м	0,264	0,275	0,368
	L_{12}, мкГн/м	0,068	0,137	0,183
	L_{22}, мкГн/м	0,176	0,139	0,185
	C_{11}, пФ/м	46,8	222	296
	C_{12}, пФ/м	18,1	219	292
	C_{22}, пФ/м	70,3	440	588
Модальные	C, дБ	10	3	
	Z_0, Ом	61,24	25	
	k	0,3162	0,70	
	n	0,8165	0,71	
	εr	1	2,8	5

Теперь приведём скриншоты построенных в AsymH Extended графиков по данным из таблицы. На рис. 1 имеется скриншот общей схемы с произвольными нагрузками на портах.

Таким образом, графики частотных характеристик, построенные в AsymH extended, совпали с графиками, приведенными в [3], что свидетельствует о правильности расчетов и корректности отображения их в графическом виде. Представленный продукт может быть ис-

пользован в реальном проектировании СВЧ-устройств на связанных линиях с однородным диэлектрическим заполнением.

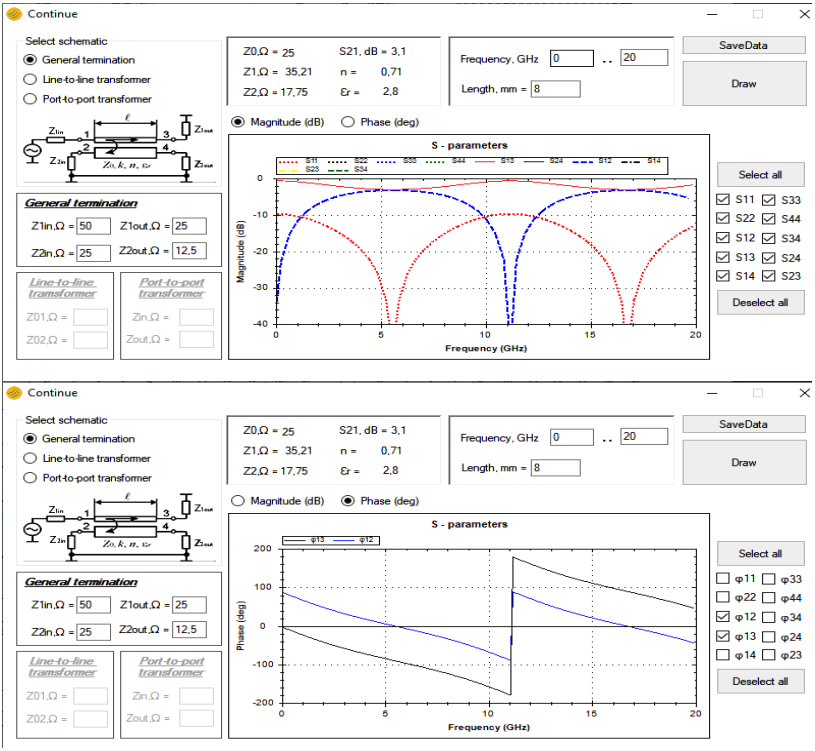


Рис. 1. Графики АЧХ и ФЧХ, построенные по общей схеме с произвольными нагрузками

ЛИТЕРАТУРА

1. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019619406. AsymH / Авторы-правообладатели: Сычев А.Н., Бондарь В. А., Дагба К.Б.-Б., Степанюга А.И., Калменов Р.А. – Заявка № 2019616059, поступ.: 27.05.2019, опубл.: 17.07.2019. – Бюл. № 7. – http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/PrEVM/RUNWPR/00/002/019/619/406/2019619406-00001/document.pdf

2. Wincza K., Gruszczynski S. Asymmetric coupled-line directional couplers as impedance transformers in balanced and *n*-way power amplifiers // IEEE Trans. – 2011. – Vol. MTT-59, No. 7. – P. 1803–1810.

3. Сычев А.Н. Анализ и синтез несимметричных связанных линий в однородной диэлектрической среде // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 11–19. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-1-11-19

УДК 004.415.25

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПАССИВНЫХ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Т.Н. Файль, Ю.А. Новичкова, студенты;
А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.; А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.;
А.С. Сальников, доцент каф. ФЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, timafayl@gmail.com

Описана методика структурно-параметрического синтеза пассивных СВЧ-компонентов с использованием генетического алгоритма.
Ключевые слова: пассивные СВЧ-компоненты, структурно-параметрический синтез, генетический алгоритм, ЭС-модель.

Проектирование СВЧ-полупроводниковых устройств (ППУ) проводится в специализированных системах автоматизированного проектирования (САПР) с использованием электрических и геометрических моделей компонентов, являющихся составляющими проектируемого устройства. Используемые при проектировании модели компонентов должны точно описывать их реальное поведение, чтобы спроектированное устройство после изготовления обладало ожидаемыми характеристиками. Широкое распространение для проектирования в САПР получили математические модели в виде эквивалентных схем (ЭС-модели), структура которых отражает протекающие в СВЧ-компонентах физические процессы.

Сложностью, с которой сталкиваются разработчики моделей при разработке моделей в виде ЭС, является выбор структуры ЭС-моделей компонентов, используемых в устройстве. Значения элементов разрабатываемых моделей должны быть физичными, а структура моделей должна корректно описывать физические процессы компонентов, соответствующие выбранному технологическому процессу.

Для решения данной проблемы в работе [1] проведен морфологический анализ структур ЭС-моделей пассивных СВЧ-компонентов, благодаря которому определено множество допустимых схемных решений для различных типов компонентов. На основе проведенного анализа разработана методика структурно-параметрического синтеза пассивных СВЧ-компонентов. Методика выполняет декомпозицию структуры модели на отдельные двухполюсные звенья, где в качестве каждого звена допустима схема из множества предопределенных решений. Для каждой схемы каждого звена методика осуществляет аналитический расчет значений элементов из результатов экстракции. Аналитический расчет осуществляется для каждой частотной точки,

следовательно, следующим шагом методики является выбор из набора значений элементов в частотном диапазоне некоторого оптимального значения. Для выбранных значений элементов осуществляется расчет отклонения импеданса звена от импеданса измеренного реального компонента. В конечную модель автоматически выбираются звенья, обеспечивающие наименьшее отклонение импеданса модели от исходных измерений. Недостатком данной методики является то, что расчет значений элементов осуществляется аналитически, однако не для всех схем морфологического анализа возможен вывод аналитических выражений.

В данной работе предлагается методика структурно-параметрического синтеза пассивных СВЧ-компонентов с использованием генетического алгоритма и множества допустимых схемных решений, полученного на основе морфологического анализа в работе [1]. В отличие от методики, предложенной в [1], выполняющей перебор всех возможных решений с аналитическим расчетом, в данной работе поиск будет осуществляться на основе генетического алгоритма, оптимизирующего как структуру модели, так и значения её элементов. Это позволит: а) минимизировать отклонение целевых характеристик модели от исходных измерений, так как аналитический расчет может дать минимальную ошибку только в одной частотной точке в ущерб точности модели в остальном частотном диапазоне; б) использовать в процессе синтеза более сложные двухполюсные звенья, в частности те виды звеньев, для которых составление аналитических выражений затруднительно (двухполюсные звенья с двумя и более элементами).

Данная реализация алгоритма для структурно-параметрического синтеза пассивных СВЧ-компонентов предполагает получение нескольких решений с заданной точностью, что позволит разработчику выбрать оптимальную структуру ЭС-модели с точки зрения точности и сложности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяинов А.Е. Автоматизированное построение моделей пассивных компонентов и их применение при структурно-параметрическом синтезе малошумящих СВЧ-транзисторных усилителей: дис. … канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 168 с.

УДК 004.415.25

ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЕМ ВСТРОЕННОЙ КАЛИБРОВКИ

А.А. Кун, студент каф. КСУП
г. Томск, ТУСУР, akun971@gmail.com

Представлен принцип работы модуля встроенной калибровки и описание программного обеспечения для управления модулем.
Ключевые слова: СВЧ, ВАЦ, векторный анализатор цепей, калибровка, разработка ПО.

Калибровка векторного анализатора цепей – это долгий и кропотливый процесс, качество которого зависит от температуры окружающей среды, качества исполнения аксессуаров СВЧ-тракта, оператора, проводящего калибровку, санитарно-гигиенических условий помещения и других факторов. Например, процесс калибровки одного порта векторного анализатора цепей методом SOLT может занимать от 5 мин времени. При изменении температуры окружающей среды или других факторов, влияющих на точность измерения, возникает дрейф параметров прибора, вследствие чего необходимо проводить повторную калибровку, что приводит к большим времязатратам. Также некоторые измерительные задачи могут потребовать переноса прибора или изменения измерительного тракта, что опять же приводит к выполнению повторной калибровки системы.

Для решения этих проблем используются модули встроенной калибровки. Модуль представляет собой 2-портовое устройство, управляемое с помощью USB-интерфейса. Модуль встроенной калибровки подключается между векторным анализатором цепей и непосредственно к измеряемому устройству. Схема подключения показана на рис. 1. Модуль имеет набор встроенных калибровочных нагрузок SOLT (от первых букв слов): Short – короткое замыкание (КЗ), Open – холостой ход (ХХ), Load – согласованная нагрузка (СН), Thru – перемычка между портами [1].

Рис. 1. Схема подключения модулей встроенной калибровки

В процессе калибровки сверхвысокочастотный ключ, управляемый микроконтроллером, последовательно подключает к порту В встроенные нагрузки. Программное обеспечение векторного анализатора совместно с программой управления модулем встроенной калибровки измеряет подключенные калибровочные нагрузки, далее на основе измеренных характеристик рассчитываются калибровочные коэффициенты и учитываются в последующих измерениях [2].

Программа управления модулем встроенной калибровки позволяет определить, к какому порту анализатора подключён модуль, переключать в нужном порядке состояния (встроенные нагрузки) порта В, сохранять характеристики нагрузок во встроенную память модуля, рассчитывать калибровочные коэффициенты и отправлять их программному обеспечению векторного анализатора цепей.

Таким образом, калибровочный модуль, встроенный в измерительный тракт, позволяет в необходимый момент производить калибровку анализатора, не отключая исследуемое устройство, и не разрывая измерительный тракт. Такой процесс калибровки исключает влияние множества факторов, негативно сказывающихся на точности проводимого измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. – М.: ИД МЭИ, 2009. – 500 с.

2. Губа В.Г., Ладур А.А., Савин А.А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24).

УДК 004.415.53

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ

Ю.А. Новичкова, Т.Н. Файль, студенты;
А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, yulya.novichkova21@gmail.com

Представлено применение инструмента WinAppDriver в автоматизации тестирования модуля деэмбеддинга программы DataViewer.
Ключевые слова: деэмбеддинг, десктоп, C#, Windows forms, автоматизация тестирования, тестирование пользовательского интерфейса, WinAppDriver.

Одним из видов обработки результатов СВЧ-измерений является процедура деэмбеддинга. Деэмбеддинг – это процедура исключения

влияний контактных площадок и подводящих линий из результатов измерений [1]. Эта процедура соответствует сдвигу плоскостей отсчета A1–A2 (плоскости после калибровки на пластине) в плоскости B1–B2 (рис. 1).

Целью данной работы является автоматизация тестирования модуля деэмбеддинга (рис. 2), реализованного в программе DataViewer [1, 2]. Математические формулы модуля ранее были покрыты так называемыми юнит-тестами [3]. В данной работе описывается автоматизация тестирования модуля со стороны пользовательского интерфейса.

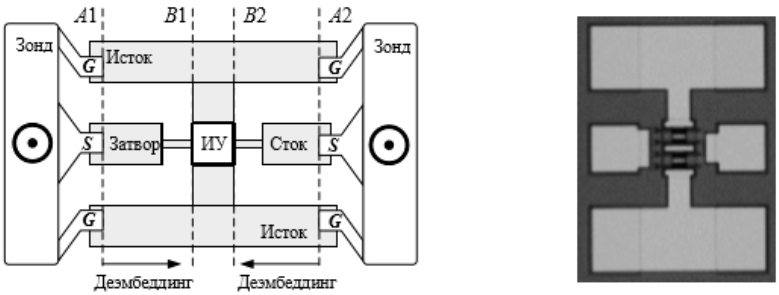


Рис. 1. Эскиз и фотография тестовой структуры с ИУ

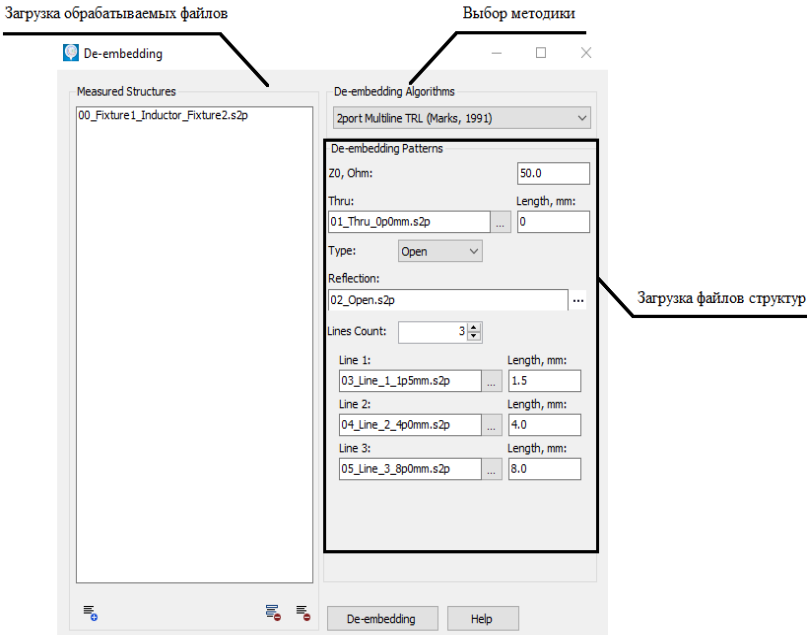


Рис. 2. Интерфейс модуля De-embedding

Обзор инструмента WinAppDriver для автоматизации тестирования. WinAppDriver [4] используется для управления любыми приложениями Windows с классическими элементами управления Windows (Win32), WPF, WinForms и UWP, используя широкий спектр языковых привязок, в том числе C# (языке разработки модуля деэмбеддинга).

Для работы с инструментом необходимо на компьютере включить режим разработчика и к проекту исходного кода добавить библиотеку Appium.WebDriver вместе с необходимыми для его работы зависимыми пакетами.

Написание автоматических сценариев с использованием WinAppDriver. Способы обращения к элементам интерфейса: по имени элемента, имени класса элемента, id, xpath, координатам. В нахождении свойств элемента используется, например, программа Inspect [5].

Ниже приведен пример составленного автоматического сценария. Написание такого сценария при наличии опыта программирования занимает 5 мин. В результате было составлено 54 автоматических сценария, общее время выполнения которых занимает 29 мин, в то время как ручное тестирование одного тестового случая занимает 1 ч.

```
[TestMethod]
public void FailOpenFile(){
// Выбор алгоритма 2port Open (Wijnen, 1987) в комбобоксе
_session.FindElementByName("ID_AlgorithmsGroupBox").
  FindElementByName("ID_AlgorithmsComboBox").Click();
Thread.Sleep(TimeSpan.FromSeconds(0.5));
_session.FindElementByName("2port Open (Wijnen, 1987)").
  Click();

// Добавляем некорректного файла в поле Open
_session.FindElementByName("ID_OpenFileLoadControl").
  FindElementByName("ID_FileLoadButton").Click();
SetFilePath(GetPathFilesFail, "2_Open_Fail.s2p");

// Добавляем корректного файла в поле Measured Structures
_session.
  FindElementByName("ID_AddMeasuredFilesButton").Click();
SetFilePath(GetPathFiles, "1_Meas.s2p");

// Проводим деэмбеддинг и сохраняем файл
_session.FindElementByName("ID_DeembeddingButton").Click();

// Находим в окне текст, что добавлен некорректный файл
// 65535 - ID контрола, в котором находится текст сообщения
WindowsElement skipFiles =
```

```
  _session.FindElementByAccessibilityId("65535");
Assert.IsNotNull(skipFiles);
Assert.IsTrue(skipFiles.
  Text.Contains("Pattern file format is incorrect."));
_session.FindElementByName("OK").Click();
}
```

Заключение. Для модуля деэмбеддинга написано 114 тестовых сценариев, на основе которых написано 6 автоматических сценариев для проведения автоматизированного тестирования пользовательского интерфейса, время выполнения которых составляет 3 мин.

Результатом работы стало внедрение автоматизированного тестирования в процесс поставки приложения DataViewer, которое осуществляется по принципу непрерывной интеграции.

ЛИТЕРАТУРА

1. 50ohm Technologies. Программа анализа и обработки СВЧ-измерений DataViewer v.1.8: руководство пользователя. – Томск, 2015. – 15 с.
2. 50ohm Technologies DataViewer [Электронный ресурс]. – URL: https://50ohm.tech/dataviewer/ (дата обращения: 06.09.2018).
3. Савин Р. Тестирование Дот Ком, или Пособие по жестокому обращению с багами в интернет-стартапах. – М.: Дело, 2007. – 312 с.
4. WinAppDriver. [Электронный ресурс]. – URL: https://github.com/microsoft/WinAppDriver (дата обращения: 13.09.2019).
5. Inspect [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/winauto/inspect-objects (дата обращения: 20.02.2018).

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 57.033

КОЖНО-ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ

И.А. Арынов, студент каф. КУДР
Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР
г. Томск, ТУСУР, iskak.arynov18@gmail.com

Экспериментальные исследования кожно-гальванической реакции человека производились с помощью датчика проводимости электронной медицинской платформы MySignals. Показана перспективность регистрации психофизиологического напряжения с помощью измерения КГР датчиками электронной медицинской платформы MySignals.
Ключевые слова: кожно-гальваническая реакция, MySignals.

Кожно-гальваническая реакция (син.: психогальваническая реакция, рефлекс кожно-гальванический, рефлекс психогальванический, феномен Тарханова) – представляет собой изменения разности потенциалов и уменьшение электрического сопротивления между двумя участками поверхности кожи (например, тыльная и ладонная поверхности кисти) при раздражениях, связанных с эмоциональной реакцией организма [1]. Исследования КГР проводят для изучения психофизиологических реакций человека, особенностей его личности и уровня активности симпатической нервной системы, что широко используют в психофизиологических, физиологических и криминалистических исследованиях в качестве высокочувствительного, простого и технически легко определяемого показателя, а также для оценки нейропси-

хического напряжения человека. Регистрация КГР является важным компонентом исследований на полиграфах, так называемых «детекторах лжи».

Есть два метода регистрации КГР по Тарханову, т.е. регистрация разности потенциалов между двумя участками кожи и метод Фере – исследование электропроводности кожи по пропускаемому через неё току. При регистрации кожных потенциалов в электрической цепи отсутствует внешний источник тока; значения потенциалов фиксируются чувствительным гальванометром.

Экспериментальная часть. Экспериментальные исследования КГР проводились на электронной медицинской платформе MySignals [3] с помощью специального датчика, осуществляющего измерение по методу Фере.

Этот датчик измеряет электрическую проводимость кожи, сопротивление которой изменяется в зависимости от психофизиологического состояния человека. Как указывается в [1], биоэлектрическая активность кожи обусловлена активностью симпатической нервной системы и деятельностью потовых желез. КГР может регистрироваться везде на поверхности кожи, кроме участков, лишенных потовых желез (красная кайма губ и др.). В данных экспериментах использовались подключения контактов к пальцам левой руки.

Эксперимент заключается в следующем. КГР измерялась вначале в спокойном состоянии человека, потом производилось некоторое воздействие на испытуемого; прослушивание музыки, просмотр видеороликов или физическая нагрузка.

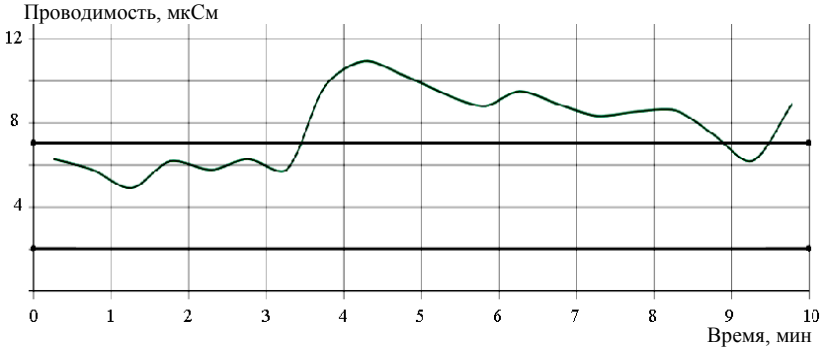


Рис. 1. График зависимости кожной проводимости испытуемого от времени до и при прослушивании музыки

На рис. 1 показано изменение кожной проводимости пальцев руки в зависимости от психоэмоционального состояния человека, кото-

рое возникало при прослушивании музыки в стиле «Хард-рок». На графике показано, что в спокойном состоянии проводимость кожи испытуемого имела величину, примерно равную шести микросименсам. С началом прослушивания проводимость кожи стала увеличиваться и достигла своего максимального значения примерно за минуту. Далее в течение остального промежутка времени проводимость кожи плавно уменьшалась до нормального состояния.

В экспериментах при других воздействиях (видеоролики комедийного жанра, «ужастики» или физическая нагрузка) наблюдалась примерно такая же динамика изменений: вначале происходило увеличение электропроводимости кожи, а потом постепенное ее уменьшение до почти нормального состояния. Все это свидетельствует об адаптации (привыканию) испытуемого к оказываемым психофизиологическим воздействиям.

Вследствие этого был проделан такой эксперимент, в котором производились подряд десятиминутные воздействия, но разного рода (прослушивание музыки и демонстрация видеороликов разных жанров, физическая нагрузка), чтобы уменьшить эффект привыкания.

В этом эксперименте, продолжавшемся в течение часа, удалось получить изменение кожной проводимости от двух до четырнадцати микросимменсов (в семь раз!), без заметного эффекта привыкания.

Таким образом, в проделанных экспериментах были получены результаты, показывающие перспективность регистрации психофизиологического напряжения (предвестника стрессового состояния) с помощью измерения КГР датчиками электронной медицинской платформы MySignals. При этом использование этой медицинской платформы дает возможность воспользоваться современными информационными технологиями получения медико-биологической информации, ее структурирования и хранения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожно-гальваническая реакция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.skgr.narod.ru/history.htm (дата обращения: 18.02.2020).

2. Кожно-гальваническая реакция [Электронный ресурс]. – Режим доступ: https://pandia.ru/text/80/293/98303.php(дата обращения: 18.02.2020).

3. MySignals [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.libelium.com/downloads/documentation/mysignals_technical_guide.pdf (дата обращения: 18.02.2020).

УДК 53.097

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ В СИД НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ

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

Проведено исследование ВАХ flip-chip-светодиодов в зависимости от времени и режимов испытаний при номинальном токе нагрузки. После длительных испытаний наблюдались нестабильности электрических характеристик как в области микро- и нанотоков, так и при номинальном режиме. Проведенные исследования позволяют прояснить физику процесса деградации структуры flip-chip-светодиодов.

Ключевые слова: квантовая запутанность, центры окраски, щелочно-галоидные кристаллы, flip-chip-светодиод, неоднородность структуры, механизмы деградации, нестабильность тока.

Светодиодное освещение стало альтернативой традиционным лампам накаливания благодаря низкому энергопотреблению и долговечности. Тем не менее проблема увеличения долговечности остается актуальной. Сверхъяркий светоизлучающий диод (СД) 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 связывается 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 [3, 4]. С научной и практической точки зрения вызывает интерес проведение таких же исследований для светодиодов (СД), изготовленных по flip-chip-технологии.

Традиционная схема монтажа предполагает размещение СИД кристалла вверх. 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».

Экспериментальная часть. ВАХ СИД измерялись с помощью прецизионного измерителя фирмы «Keysigth» модели B2902A.

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

Поскольку нестабильности появлялись в «конце» ВАХ измерения проводились в диапазоне напряжений 2,6–3,0 В и в режиме «Long». В этом режиме прибор проводил измерения в каждой точке в течение 0,2 с. При количестве точек 3000 время измерения составляет примерно 10 мин. Как показал эксперимент, этого времени достаточно для появления нестабильности тока в светодиоде.

На рис. 1 приведены ВАХ образца 171.7 до и после испытаний.

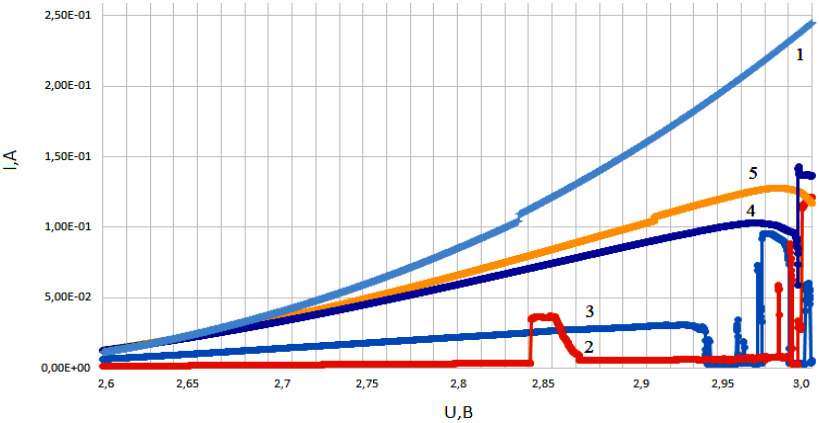


Рис. 1. ВАХ образца 171.7

Образец испытывался в течение суток при токе 350 мА. На рис. 1 приведена ВАХ образца до испытаний (кривая *1*). После испытаний и отдыха в течение суток были проведены повторные измерения (кривая *2*). Как видно из рисунка, ток через светодиод резко уменьшился и при напряжении более 2,8 В стали появляться «всплески» тока. Последующие измерения проходили подряд (друг за другом) без перерыва (кривые *3*–*5*). Как видно из рисунка, наблюдается тенденция на восстановление к первоначальной величине тока. Действительно, через некоторое количество дополнительных измерений ток восстанавливался.

Обсуждение результатов. Возможно несколько вариантов объяснения полученных результатов. После длительных испытаний могут включаться ионные механизмы (электромиграция заряженных дефектов), что приводит к увеличению диаметров каналов утечки и разрастанию пятен затемнения туннельной ЭЛ от испытания к испытанию, появлению дополнительных токов утечки и нестабильности, а также к возникновению эффекта релаксации после испытаний. Такой процесс может быть связан с перезарядкой граничных состояний, играющих роль «затвора» канала (как в полевом транзисторе) [2]. Другое объяснение может быть связано с особенностью конструкции flip-chip СИД, в которой контактные площадки просто накладываются на контакты матрицы. При этом кристалл покрывается адгезивным материалом, обеспечивающим прочность соединения и теплопроводность. В связи с этим слабым местом в такой конструкции может являться качество контакта соединения электродов СИД с матрицей. В результате испытаний, когда через контакты проходит большой ток, места соединения могут сильно нагреваться и их качество ухудшаться, вследствие этого и могут возникать нестабильности тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закгейм А.Л. Исследование тепловых процессов в мощных InGaN/GaN флип-чип светодиодах с использованием инфракрасной тепловизионной микроскопии / А.Л. Закгейм, Г.Л. Курышев, М.Р. Мизиров // ФТП. – 2010. – Т. 44, вып. 3. – С. 390–396.

2. 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.

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

4. Томашевич А.А. Изменение картин туннельной электролюминесценции светодиодов на основе нитрида галлия в зависимости от режимов и времени испытаний / А.А. Томашевич, С.Г. Еханин, К.К. Слепцов, С.Л. Аржаков // Электронные средства и системы управления: матер. междунар. науч.-практ. конф., г. Томск, 2017. – Ч. 1-1. – С. 156–159.

УДК 612.115.2

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ АНАЛИЗА СВЕРТЫВАЕМОСТИ КРОВИ

Ю.Д. Люшневская, студентка;
Ф.А. Губарев, доцент ИШХБМТ, к.ф.-м.н.
г. Томск, НИ ТПУ, ИШХБМТ, juliasytnik55@yandex.ru

Представлены результаты анализа времени свертывания плазмы цельной крови, обсуждены полученные результаты пяти контрольных экспериментов. Рассмотрены преимущества применяемого метода, актуальность разрабатываемого коагулометра. Обсуждена конструкция разрабатываемого прибора.
Ключевые слова: протромбиновое время, свертываемость крови, спекл-корреляция, спекл-изображение.

На сегодняшний день распространяется применение оптических методов диагностики в медицине благодаря отсутствию физического воздействия на объект исследования, в результате оптическая диагностика является безвредной для организма человека [1]. Время свертываемости крови является важным параметром крови, т.к. отклонения от нормы могут привести к тромбообразованию или к кровотечениям. Особенно важно контролировать этот параметр во время оперативных вмешательств и после операций на органах сердечно-сосудистой системы для исключения послеоперационных тромбообразований [2]. Таким образом, разработка нового оптического коагулометра для анализа времени свертываемости цельной крови является актуальной задачей.

Разрабатываемый прибор позволяет проводить анализ времени свертываемости крови бесконтактным оптическим методом. Возможен анализ как цельной крови, так и плазмы крови, что делает прибор универсальным не только для лабораторных исследований, но и для операционных.

В основе разрабатываемого прибора лежит метод корреляции цифровых спекл-изображений. Когда когерентное излучение освещает кровь, блики, рассеянные от форменных элементов крови, смешиваются и формируют пространственную спекл-картину. В процессе свертываемости крови происходит движение форменных элементов крови, образование и рост фибриновых сетей. Чем быстрее это движение, тем сильнее отличаются спекл-картины, образованные в первый и второй моменты времени. Движение прекращается после образования фибринового сгустка. Спекл-картины становятся статичными, значение коэффициента корреляции стремится к 1 [3].

Период времени от начала процесса коагуляции до момента достижения 1 коэффициентом корреляции является протромбиновым временем, или временем свертываемости крови. Разрабатываемый коагулометр содержит лазерный диод, кювету, в которую помещается образец для исследования, USB-камеру, регистрирующую изменения спекл-изображений. Записанная информация передается на персональный компьютер. С помощью коммерчески доступного приложения MatLab спекл-картины сравниваются и вычисляются значения коэффициента корреляции в течение всего анализа. Затем строятся графики зависимости коэффициента корреляции от времени и определяется протромбиновое время.

Для анализа использовалась плазма крови, помещенная в пробирки с цитратом натрия, который блокирует процесс свертываемости: 50 мкл плазмы помещается в кювету, затем добавляется 100 мкл реагента «Техпластин», запускающего процесс коагуляции. Полученные результаты 5 контрольных экспериментов приведены на рис. 1.

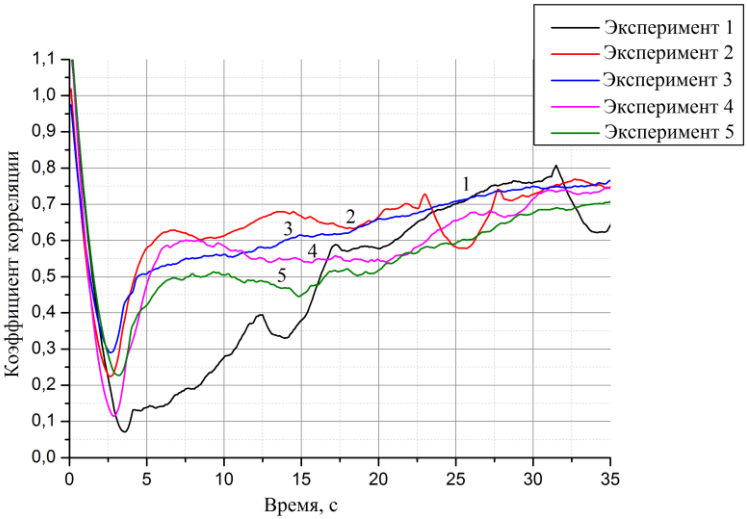


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента корреляции от времени

На представленных графиках время свертываемости составляет 32, 27, 30, 29 и 30 с для 5 контрольных экспериментов соответственно. Контрольный сравнительный результат, полученный с помощью лабораторного тромбоэластографа, составил 29 с. Следовательно, разрабатываемый прототип прибора для анализа времени свертываемости крови позволяет получать результаты с точностью 95%.

Таким образом, разрабатываемый прибор для анализа времени свертываемости крови позволяет проводить анализ времени свертываемости плазмы цельной крови. Погрешность измерения составила 5%, что допустимо для применения прибора в медицинских целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – 2010. – Ч. 2. – С. 200–215.

2. Удут В.В., Тютрин И.И., Соловьев М.А. и др. Технология низкочастотной пьезотромбоэластографии в мониторинге противотромбической терапии // Экспериментальная и клиническая фармакология. – 2017. – № 11. – С 10–17.

3. Li L., Sytnik I.D., Gubarev F.A., Pekker Y.S. Evaluation of blood plasma coagulability by laser speckle correlation // Biomedical Engineering. – 2018. – Vol. 52, № 3. – P. 177–180.

УДК 530.145

СПОСОБ СОЗДАНИЯ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛА NaCl С ПОПАРНО КВАНТОВО-ЗАПУТАННЫМИ ПИКСЕЛЯМИ

Д.Ю. Медведев, студент; С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.

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

Приведено описание способа создания пластин монокристалла NaCl с попарно квантово-запутанными пикселями, основанного на применении узконаправленного (сфокусированного) рентгеновского излучения.

Ключевые слова: квантовое запутывание, центры окраски, рентгеновские лучи, кристалл NaCl.

В настоящее время ученым удалось осуществить канал связи с квантовой запутанностью для фотонов, фермионов (электронов), квазичастиц (отдельных атомов).

Проявить эффект квантовой запутанности в твердотельных системах довольно сложный процесс. Однако появились идеи, как получить когерентные состояния в кристаллических структурах [1, 2]. В частности, использовать кристаллы с определенными дефектами структуры, в которых атом примеси находится в квазисвободном состоянии благодаря расположению вблизи вакансии. Чтобы добиться практического использования квантовых коммуникаций в кристаллических системах, нужно время существования квантовой запутанности увеличить на несколько порядков. Это удалось в [1, 2], применяя квантовую запутанность электронов, захваченных ионными ловуш-

ками в кристаллах LiF. Таким образом, была осуществлена межконтинентальная квантовая связь между кристаллическими системами [1].

В СКБ «Сталкер» были проанализированы возможности нелокальной передачи графической информации [3]. Благодаря этому анализу был разработан способ создания кристаллов-близнецов, формирования и передачи графических изображений, учитывая недостатки предыдущих способов [3, 4].

В статье [3] так же, как и в статье [1], используется окрашивание с помощью облучения гамма-квантами кобальтовой пушки. При этом в кристалле NaCl создается целый набор центров окраски, относящихся к F-центрам (F_1-, F_2-, F_3-.). Эти центры окраски являются устойчивыми при комнатной температуре и слабом освещении. Кроме того, технология создания этих центров существенно проще, чем описано в статье [4]. Следует также иметь в виду, что облучение кристаллов кобальтовой пушкой приводит к созданию квантово-запутанных электронных состояний в ионных ловушках этих кристаллов [1].

Но возникла проблема в формировании матрицы из близкорасположенных и изолированных областей кристаллов-близнецов, поскольку создание запутанных центров окраски (F-центров) производилось с помощью гамма-квантов, но при этом окрашивались и другие области кристалла, что мешало экспериментам.

В данной работе для создания отдельных изолированных (с точки зрения квантовой запутанности) друг от друга областей (пикселей) предлагается применять не гамма-излучение, как в [1–3], а рентгеновское. При этом облучать кристалл NaCl необходимо узконаправленными (сфокусированными) рентгеновскими лучами.

Для этих целей перспективно использовать поликапиллярные линзы Кумахова [5]. Линзы Кумахова состоят из большого числа изогнутых специальным образом стеклянных микрокапилляров, по которым рентгеновские лучи распространяются в режиме полного внешнего отражения – как в оптических волноводах. Указанные линзы имеют апертуры в несколько миллиметров и позволяют сфокусировать рентгеновские лучи в пятно размером в 50–500 мкм на расстоянии в 20–80 см от источника излучения.

С помощью установки, схема которой представлена на рис. 1, можно сформировать в образце кристалла матрицу из множества независимых друг от друга квантово-запутанных областей (пикселей), в которых будет сформирован необходимый набор центров окраски.

Для создания пластин кристалла с попарно квантово-запутанными пикселями для нелокальной передачи графических изображений, достаточно расколоть первоначальную пластину вдоль на две части.

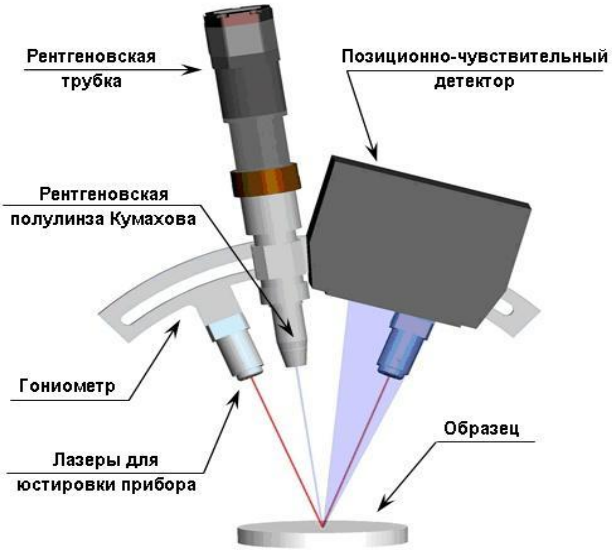


Рис. 1. Схема установки для создания квантово-запутанных пикселей в пластине кристалла NaCl

Таким образом, появляется возможность нелокальной передачи графических изображений более высокого качества на основе радиационно-окрашенных щелочно-галоидных кристаллов с запутанными электронными состояниями. Набор центров окраски из трех составляющих позволит формировать графическую информацию для нелокальной передачи цветных изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental quantum liaisons between entangled electrons in ion traps of thermoluminescent crystals. Arxiv: quant-ph/0611109, November 10, 2006.

2. Артищев С.А., Еханин С.Г., Орлова. Ю.Э., Попов Д.Ю. Дистанционное влияние квантовых связей между запутанными электронами на электропроводность кристалла NaCl // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». 28–30 ноября 2018 г.: в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 101–104.

3. Медведев Д.Ю. Анализ возможности нелокальной передачи графической информации // 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. 208–210.

4. Гольдберг А.Б., Голубцов З.З., Лукашук С.Б. Применение кристаллов NaCl, сенсибилизированных для прямой записи изображения // Тезисы докл.

Всерос. науч. конф. «Физика диэлектриков и новые области их применения»: Информационные технологии. – Караганда, 1978. – С. 74–75.

5. Kumakhov M.A. Channeling of photons and new x-ray optics, Nucl.Instr& Meth. – 1990. – B48, 1–4. – P. 283–286.

УДК 530.145

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СЛАБЫХ ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТОКОВ

Д.Ю. Попов, магистрант каф. КУДР;
А.А. Швадленко, ученица МАОУ СОШ №40
Научный руководитель С.Г. Еханин, д.ф.-м.н., проф. каф. КУДР
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, stalker@main.tusur.ru

Приведено описание конструкции переносного устройства для осуществления дистанционного влияния квантовых связей между запутанными электронами на электропроводность кристалла NaCl.
Ключевые слова: квантовое запутывание; центры окраски; наведенная электропроводность; квантовые телекоммуникации.

Эксперименты, описываемые в статье [1], были выполнены с пространственно-разделенными квантово-запутанными кристаллами для термолюминесцентной дозиметрии, находящимися в Батон-Руж, Луизиана (США) и Живарлэ (Франция). Было показано, что квантовые связи могут реализовываться при расстояниях между кристаллами до 8182 км.

В работе [2] чипы из искусственно выращенного кристалла нелегированного хлорида натрия были облучены гамма-излучением на медицинской кобальтовой пушке одновременно и совместно (в одном месте) с целью создания запутанных квантовых ловушек (центров окрашивания) в смежных чипах. Производилось фотостимулированное обесцвечивание master-образца, удаленного на 5 м от slave-образца (запутанного с первым), у которого измерялась электропроводность. Были получены экспериментальные результаты на slave-образце, коррелированные с процессом обесцвечивания master-образца.

Однако в работе [2] применялось оборудование, не позволяющее проводить мобильные исследования. В данной работе предлагается конструкция переносного устройства для осуществления дистанционного влияния квантовых связей между запутанными электронами на электропроводность кристалла NaCl.

Описание схемы электрометрического усилителя. Схема электрометрического усилителя приведена на рис. 1. Электрометрический усилитель собран на полевом транзисторе с использованием метода интегрирования-дифференцирования [3].

Входной каскад интегратора собран по схеме истокового повторителя на полевом транзисторе Т1. Это позволяет получить меньшие шумы. Интегратор, состоящий из входного каскада и операционного усилителя У1, охвачен отрицательной обратной связью через малогабаритный конденсатор С1 емкостью 10 пФ.

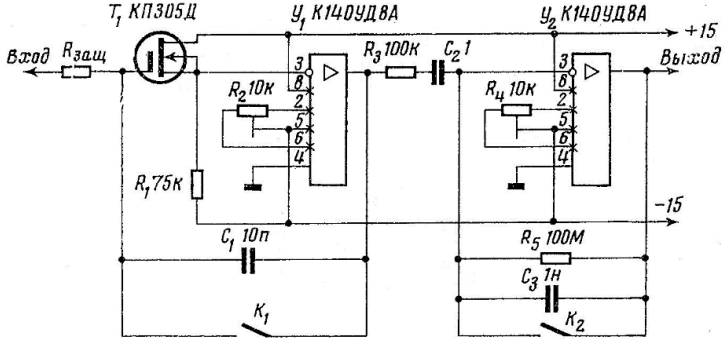


Рис. 1. Принципиальная схема электрометрического усилителя

Дифференциатор усилителя собран по обычной схеме на операционном усилителе У2. Дифференцирующий конденсатор С2 имеет емкость 1 мкФ ±0,1%, резистор R5 имеет сопротивление 100 Мом ±0,1%. Для ограничения полосы пропускания усилителя величины постоянных времени цепочек R3C2 и R5C3 выбраны равными постоянной времени всего усилителя. Балансировка дифференциатора производится переменным резистором R4. На выходе дифференциатора установлен активный фильтр 3 порядка. Температурный дрейф усилителя в основном определяется операционным усилителем У2 и не превышает 5×10^{-18} А/°С. Усилитель имеет чувствительность не более 4×10^{-17} А и, как показано в работе [3], использовался для построения дифференциальных электрометров высокой чувствительности.

Для оцифровывания сигнала электрометрического усилителя и передачи информации на ноутбук использовалось устройство, собранное на полнофункциональной отладочной плате Arduino Nano.

В процессе разработки устройства была произведена установка программы Arduino на ноутбук и подключение платы Arduino Nano с выбором процессора ATmega328P (Old Bootloader) и с подключением com-порта. Написан код для вывода данных в монитор порта.

Таким образом, разработано требуемое устройство для усиления слабых постоянных электронных токов с оцифровкой выходного сигнала и вывода его на монитор ноутбука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Desbrandes R., Van Gent D.L. Intercontinental quantum liai-sons between entangled electrons in ion traps of thermolumi-nescent crystals. Arxiv: quant-ph/0611109, November 10, 2006.

2. Артищев С.А., Еханин С.Г., Орлова Ю.Э., Попов Д.Ю. Дистанционное влияние квантовых связей между запутанными электронами на электропроводность кристалла NaCl // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 28–30 ноября 2018 г.: в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2018. – С. 101–104.

3. Антоновский А.А., Блинов В.Н. Электрометрический усилитель // ПТЭ. – 1977. – № 4. – С. 137–139.

4. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 464 с.

УДК 615.831.6

ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СВЕТОВЫХ МЕЛЬКАНИЙ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Д.Н. Вахрушева, студентка

Научный руководитель М.Н. Романовский, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, rmn@vtomske.ru

Рассмотрены результаты экспериментального анализа взаимосвязи критической частоты световых мельканий и пропускной способности человека-оператора.

Ключевые слова: критическая частота световых мельканий, пропускная способность человека-оператора, корреляционный анализ.

Прогнозирование и оптимизация работоспособности человека предполагают контроль его функционального состояния (ФС). Объективными и достаточно надежными индикаторами ФС являются скорость и точность сенсомоторных реакций [1, 2]. В качестве индикатора лабильности зрительной системы (ЗС) используется критическая частота световых мельканий (КЧСМ) [2].

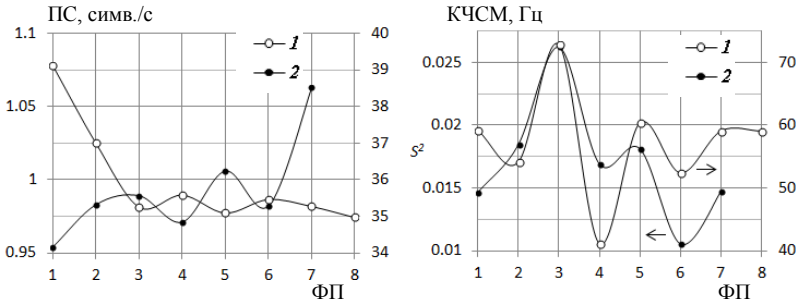
Принято считать, что индивиды с более высокими значениями КЧСМ быстрее воспринимают информацию и совершают движения в более высоком темпе. Вместе с тем, в [3] обнаружена обратная корреляция КЧСМ с такими параметрами зрительного восприятия, как пропускная способность ЗС и объем зрительной информации, в [4] – между КЧСМ и пропускной способностью (ПС) человека-оператора.

Цель настоящей работы – корреляционный анализ взаимосвязи ПС и КЧСМ.

Первичные экспериментальные данные взяты из [4]. Измерения КЧСМ без дополнительных воздействий чередовали с определением ПС. Группа испытуемых сформирована случайным образом.

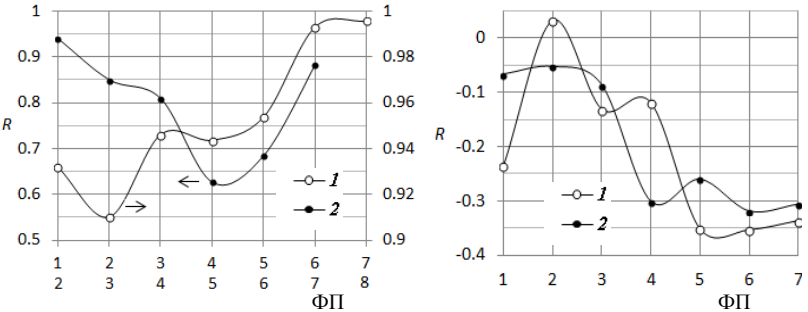
В условиях эксперимента в последовательности всех функциональных проб (ФП) спад выборочных средних КЧСМ сопровождается повышением ПС (рис. 1, *а*).

Коэффициенты корреляции и ПС, и КЧСМ в последовательности пар ФП (рис. 2, *а*) согласуются с оценками дисперсии выборок (см. рис. 1, *б*): минимум *R* для пары КЧСМ; *2*, *3* – соответствует максимум дисперсии при 3-й ФП, минимум *R* для пары ПС; *4*, *5* – максимум при 5-й пробе. Коэффициенты корреляции ПС на КЧСМ в последовательности ФП (см. рис. 2, *б*) также согласуются с оценками дисперсии.



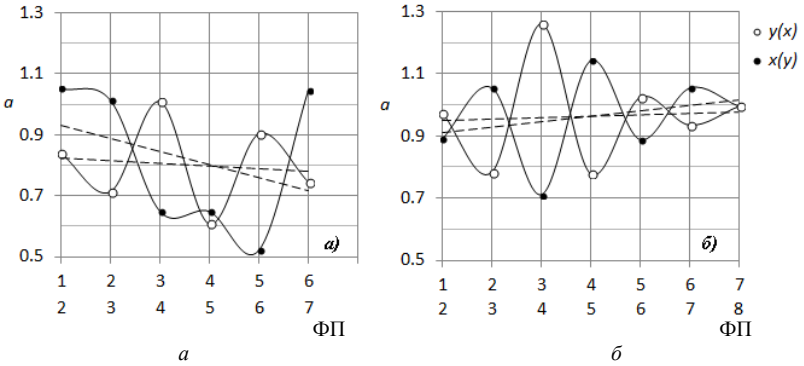
а *б*

Рис. 1. Выборочные средние (*а*) и несмещенные оценки дисперсии (*б*) КЧСМ (*1*) и ПС (*2*) в последовательности ФП



а *б*

Рис. 2. Коэффициенты корреляции КЧСМ (*1*) и ПС (*2*) в последовательности пар ФП (*а*) и ПС на КЧСМ до (*1*) и после (*2*) определения ПС в последовательности ФП (*б*)



а *б*

Рис. 3. Наклон сопряженных регрессионных прямых ПС (*а*) и КЧСМ (*б*) в последовательности пар ФП

Коэффициенты корреляции пар ПС и КЧСМ (см. рис. 2, *а*) тесно связаны с параметрами соответствующей аппроксимации. Колебания наклона сопряженных регрессионных прямых $y = a + b\,x$ (рис. 3) предопределяются разнонаправленностью изменений ПС и КЧСМ с различными начальными значениями. Коэффициент корреляции ПС и КЧСМ (см. рис. 2, *б*) теснее связан с параметрами аппроксимации ПС на КЧСМ до ПС ($R^2 = 0{,}87$–$0{,}90$).

Отношения конечных разностей (ОКР) выборочных средних ПС и КЧСМ до 6-й пары ФП изменяются линейно с достоверностью 0,98 и 0,76 при КЧСМ до и после определения ПС соответственно. Последующее статистически значимое повышение ПС (сумма «нетипичных» рангов по Вилкоксону равна нулю) приводит к резкому возрастанию модуля ОКР. При этом КЧСМ уменьшается как до, так и после определения ПС.

ПС и КЧСМ не состоят непосредственно в причинно-следственных отношениях (косвенная регрессия). Понижение КЧСМ после повышенной нагрузки на зрение обычно связывают с утомлением. Согласованные колебания выборочных значений ПС, КЧСМ и ряда других параметров в условиях эксперимента происходят, по-видимому, не из-за эндогенных факторов, более вероятным представляется эффект ритмической стимуляции головного мозга при многократном измерении КЧСМ. Значительное повышение ПС в 7-й ФП также может быть связано с процедурой измерения КЧСМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шутова С.В., Муравьева И.В. Сенсомоторные реакции как характеристика функционального состояния ЦНС // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, № 5. – С. 2831–2840.

2. Кирой В.Н. Физиологические методы в психологии: учеб. пособие. – Ростов н/Д.: ООО «ЦВВР», 2003. – 224 с.

3. Ахмадеев Р.Р., Гирфатуллина Р.Р., Халфин Р.М., Егорова Н.Н. Взаимосвязь зрительной работоспособности и показателей функционального состояния зрительной системы при пользовании персональными компьютерами // Медицинский вестник Башкортостана. – 2008. – Т. 3, № 6. – С. 17–20.

4. Вахрушева Д.Н., Матросова П.С. О корреляции критической частоты световых мельканий и сенсомоторной реакции человека-оператора // Научная сессия ТУСУР–2019: матер. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 202–205.

ПОДСЕКЦИЯ 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Лощилов А.Г.**, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н., доцент;*
*зам. председателя – **Бомбизов А.А.**, начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

УДК 621.316.722.9

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЗАРЯДА БАТАРЕИ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА

Р.В. Кирсанов, студент каф. КСУП
Научный руководитель В.А. Скворцов, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ztkznk2@gmail.com

Приведены обоснование, техническое описание, алгоритм и элементы устройства контроля емкости аккумуляторной батареи автономного объекта.
Ключевые слова: аккумуляторная батарея, емкость, автономный объект, заряд, разряд, микроконвертер, датчик Холла.

Автономная электростанция – электрическая станция, совокупность установок, оборудования и аппаратуры, используемых непосредственно для производства электрической энергии, а также необходимые для этого сооружения и здания, расположенные на определённой территории в случае, когда электроприемники (потребители) получают питание по гальванически разделенной от остальной сети общего назначения радиально-магистральной линии передачи. Автономные электростанции широко применяются в строительстве, сельском и коммунальном хозяйствах, в промышленности, то есть там, где основная сеть общего назначения удалена, работает с перебоями или имеется нехватка выделяемой мощности от питающей сети. Эти системы обеспечивают питанием автономные объекты, которые могут быть подвижными (автономные роботы, спутники, устройства с радиоуправлением, переносные средства связи) и стационарными (источники бесперебойного питания, роботы, радиостанции, системы аварийного освещения).

В таких системах нагрузка «выбирает» источник питания в зависимости от величины напряжения, обеспечиваемого генератором /

солнечной батареей (в дальнейшем – генератор). При напряжении генератора, превышающем напряжение аккумуляторной батареи (в дальнейшем – АКБ) нагрузка питается от генератора. Если вырабатываемой энергии достаточно для питания и нагрузки, и заряда АКБ, происходит пополнение энергии, запасаемой в АКБ. В случае когда генератор не способен обеспечить необходимое количество энергии, нагрузка начинает потреблять запасенную в АКБ энергию. Тогда, при совместной работе генератора и АКБ, возникает проблема оценки состояния аккумулятора (остаточной емкости) для дальнейшего обеспечения функционирования системы.

Для автономных объектов актуальной становится задача максимально достоверного измерения и контроля степени заряженности химических источников тока с целью поддержания их работоспособности. Цель такой системы: контроль текущей/ остаточной емкости АКБ, способствование восстановлению энергетического запаса по окончании сеанса работы объекта. Можно сказать, что такая система осуществляет контроль энергообмена в системе электропитания автономного объекта. В ходе исследования установлено, что оптимальной будет система, принцип работы которой отличен от найденных (рис. 1).

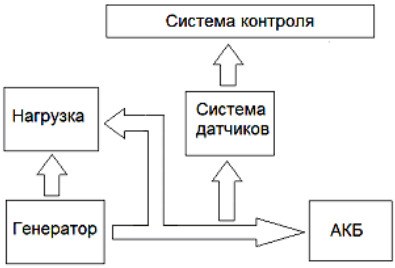


Рис 1. Обобщенная структурная схема системы контроля энергообмена автономного объекта

Ядром структуры является микроконвертер ADuC842 фирмы Analog Devices с портом 12-разрядных АЦП и EEPROM. Двуполярный линейный датчик на эффекте Холла преобразует величину тока, поступаемого в АКБ и отдаваемого АКБ в отношении 1:1000. Эта величина преобразуется в напряжение, выпрямляется и поступает на вход АЦП микроконтроллера и на компаратор. Задача компаратора – определить направление протекающего тока в каждый момент времени.

Опираясь на начальное предустановленное или накопленное значение емкости, ведется ее дальнейший подсчет с заданными коэффициентами и параметрами, получаемыми из паспорта АКБ, или после прохождения контрольно-технического цикла (КТЦ) АКБ. По дости-

жении установленного критического значения поступает сигнал отключения или снижения до допустимого минимума нагрузки и осуществления заряда батареи. Возврат к штатному режиму работы происходит по достижению номинального значения емкости АКБ, или, если требуется возврат, но номинальное значение еще не достигнуто. При завершении работы данные сохраняются в памяти и загружаются из нее при включении. Пользователь может корректировать параметры и текущее значение емкости АКБ.

Упрощенная цифровая модель устройства на базе ядра Intel 8051 (только микроконтроллер и дисплей) в среде моделирования ISIS Proteus показана на рис. 2, фотография прототипа – на рис. 3.

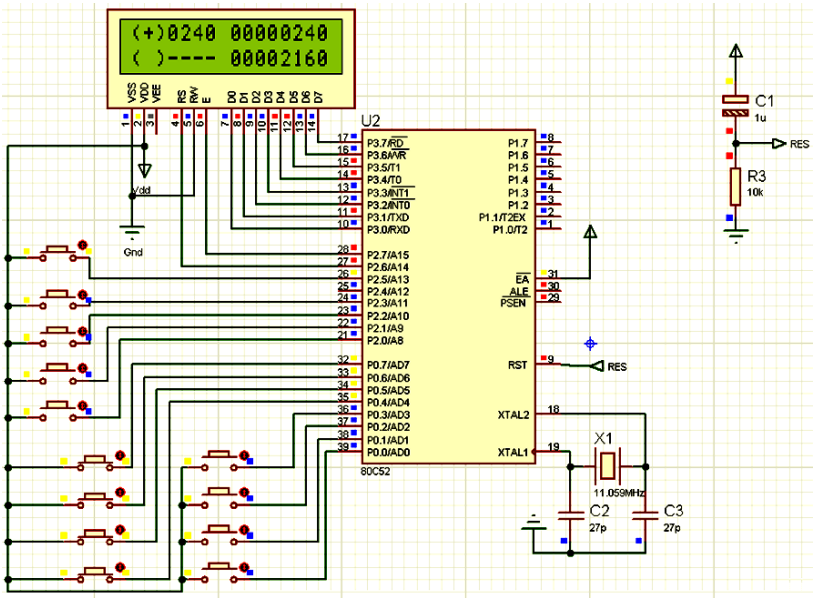


Рис. 2. Цифровая модель устройства контроля энергообмена системы электропитания автономного объекта в среде моделирования ISIS Proteus

Рис. 3. Прототип устройства контроля энергообмена системы электропитания автономного объекта

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническое описание микроконвертеров ADuC841/ADuC842/ADuC843 фирмы Analog devices. – 2017. – 95 с.

2. Бажинов О.В., Смирнов О.П., Сериков С.А и др. Гибридные автомобили. – Харьков: ХНАДУ, 2008. – 326 с.

УДК 621.391 53.072.13

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

И.С. Железнов, А.А. Ачилов, А.А. Колесников,
Д.А. Илюхин, А.Д. Большаков, студенты ИЯТШ
г. Томск, НИ ТПУ, aak248@tpu.ru

Объектом исследования стал привод для открывания окон, который позволил осуществить автоматизацию процесса проветривания теплиц, в зависимости от температуры, путем создания комплекса управления автоматизированного процесса открытия окон. В процессе работы теоретические изыскания должны быть подтверждены практическим способом исследования процесса автоматизации открытия окон со сведущим экспериментом, устанавливающим основные характеристики устройства. Проект должен поспособствовать решению таких проблем, как необходимость человеку самостоятельно контролировать постоянный уровень заданной температуры внутри теплицы, путём автоматизированного открывания окон проветривания, что делает его актуальным, конкурентоспособным и востребованным в применяемой сфере.

Ключевые слова: проветривание, микроконтроллер, автоматизация, ARDUINO, программирование, двигатель, датчик температуры.

Целью работы было создание устройства, которое позволит автоматизировать процесс проветривания теплиц с СМС-оповещением. В ходе научно-исследовательской работы проведен анализ рынка, изучены компоненты и способы реализации устройства управления открыванием окон при поддержании постоянной температуры. В функции устройства входит открытие окон теплицы при высокой температуре, закрытие окон теплицы при низкой температуре и СМС-оповещение. Сделан выбор необходимых компонентов, общая цена которых составила 2,5 тыс. руб. Устройство состоит из Arduino Uno, к которому подключены терморезистор, позволяющий замерять температуру окружающей среды, сервопривод, с помощью которого происходит процесс открытия окна, а также GPRS-SMS-модуль, позволяющий получать соответствующие уведомления о закрытии или открытии окна.

Стоит обратить особое внимание на подключение выводов резистора и терморезистора: в случае, если подключить резистор к выводу 5 В на плате, а терморезистор подключить к выводу GRD, то при изменении температуры Arduino не сможет фиксировать изменение напряжения, вызванное изменением сопротивления, вследствие этого устройство не будет работать корректно. Поэтому терморезистор подключаем к выводу A0, а центральный провод заземляем.

Сервопривод нельзя подключать напрямую к микроконтроллеру, так как ток, потребляемый сервоприводом, гораздо больше тока, выдаваемого микроконтроллером, поэтому мы используем отдельный блок питания, который подключается через разъем. Подключать блок питания к сервоприводу нужно таким образом, чтобы фазовый провод блока питания подключался к «плюсовому» контакту сервопривода, а нуль блока питания подключался к «минусовому» контакту сервопривода, после чего подключался к выходу GRD на плате. Подключать провод, соответствующий выводу PULSE на сервоприводе, можно не только к разъему 9 на плате, но и к другим того же типа (10, 6, 7 и т.д.), однако данный аспект необходимо учитывать при написании кода программы и при необходимости его скорректировать. При подключении следует учесть, что «нулевой» провод сервопривода должен быть подключен не только к блоку питания, но и к пину GRD на Arduino, в противном случае устройство будет работать некорректно (вращение будет возможно только в одном направлении).

В программной части следует верно указывать угол поворота, исходя из технических характеристик сервопривода, в нашем случае поворот возможен не более чем на 180°. Программный код загружается на микроконтроллер с помощью ПК. Он в свою очередь подключается к ПК через USB-порт. Загрузка кода осуществляется в среде Arduino. В первую очередь, в программе следует верно выбрать порт, к которому было произведено подключение, а далее уже работать со средой. Для питания устройства используется блок питания 6 В в связи со стационарностью устройства, и т.к. используется электромотор постоянного тока, рабочее напряжение которого равно 6 В, а электромоторы такого типа имеют достаточно высокие показатели крутящего момента, поэтому пригодны для открывания дверей теплицы.

После сборки всех частей, а также установки программы переходим к планированию испытания устройства. Цель испытания – удостовериться в исправности всех компонентов установки, удостовериться в корректности работы устройства при изменении окружающей температуры.

С целью проверки работоспособности устройства было проведено испытание. Для этого было подключено питание от розетки через блок питания к сервоприводу, а также питание платы посредством кабеля USB. При нагревании терморезистора в ладонях Arduino зафиксировала повышение температуры. После повышения температуры выше 320 °С контроллер отдал команду сервоприводу совершить открытие дверцы. При охлаждении терморезистора посредством приложения льда Arduino зафиксировала понижение температуры. После снижения температуры ниже 220 °С микроконтроллер отдал команду сервоприводу совершить закрытие дверцы. Дальнейшим этапом испытания стала проверка работоспособности СМС-оповещения устройством. При срабатывании устройства на указанный номер отправляется сообщение о действии устройства как при закрытии, так и при открытии дверцы.

В ходе испытания подтверждена работоспособность и применимость данного устройства в быту. Данный проект применим в аграрной области с использованием теплиц, которые могут быть оснащены нашим устройством, позволяющим организовать их автоматическое проветривание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подключение терморезистора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://psenyukov.ru/подключение-термистора-к-arduino/ (дата обращения: 15.10.2019).

2. Подключение сервопривода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https: //роботехника18.рф/сервопривод-ардуино/ (дата обращения: 15.10.2019).

3. СМС-управление с помощью GSM/GPRS-модуля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https:// www. pal-es.com /russian –home ? utm _source = yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=12863741&utm_term=gsm%20модули%20управления||3509949879&utm_content = 914004867 ||premium|| 1 (дата обращения: 15.10.2019).

УДК 53.084

РАЗРАБОТКА ПЫЛЕВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО КОРПУСА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ

В.В. Лодяев, К.В. Лисихин, студенты; В.М. Кобзев, аспирант

Научный руководитель А.Г. Лощилов, к.т.н., зав. каф. КУДР

г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, main@skbsmena.ru

Разработан пылеводонепроницаемый корпус устройства регистрации двигательной активности.

Ключевые слова: двигательная активность, корпус, IP67.

Устройства для регистрации двигательной активности всё чаще используют во многих сферах деятельности: от медицины до скотоводства [1]. Даже в повседневной жизни люди пользуются фитнес-браслетами и смарт-часами, которые снабжены датчиками движений для отслеживания их биологических показателей. Для подобных устройств необходима максимальная защищённость от внешних факторов воздействия, таких как пыль и вода. Существует стандарт, по которому классифицируются изделия в зависимости от степени защищённости от воздействий частиц пыли и влаги [2]. По способу изготовления корпусы делятся на литые и сварные [3], однако данные методы слишком трудозатратны. Хорошей альтернативой является технология послойной печати. Послойная печать (3D-печать) обладает рядом преимуществ: лучшие в сравнении с литьевым способом корпусирования стоимостные показатели, простота процесса прототипирования, а также низкая погрешность при печати могут позволить изготовить корпус, защищенный по стандарту IP67 от частиц пыли и воды.

Для стабильного и продолжительного функционирования устройства в жестких условиях эксплуатации (постоянное нахождение на улице, дождь, пыль, ветер) требуется, чтобы степень защищенности корпуса соответствовала требованиям стандарта IP67. По этой причине было принято решение разработать корпус (рис. 1), позволяющий разместить в себе два габаритных аккумулятора, а также печатный узел, на котором расположен чувствительный МЭМС-элемент (акселерометр), при этом нужно учитывать, что для печатного узла требуется жесткая фиксация.

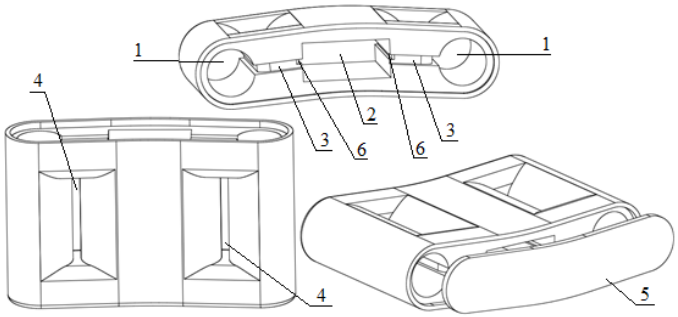


Рис. 1. Разработанный корпус с крышкой

В корпусе предусмотрены отсеки для размещения аккумуляторных батарей типоразмера 18560 (*1*). Внутри корпуса также располагается отсек для печатного узла устройства регистрации двигательной

активности (*2*), предусмотрены кабель-каналы для подключения аккумуляторов к печатному узлу (*3*), а также вырезы для установки ремня (*4*) (для крепления на крупный рогатый скот). Помимо этого, на рис. 1 представлена крышка (*5*), которая для обеспечения требований герметичности по стандарту IP67 при монтаже может быть приклеена к основанию корпуса цианакрилатными клеями, а также дихлорэтаном или дихлорметаном. Также для фиксации печатного узла в отсеке (*2*) были предусмотрены направляющие вырезы (*6*).

Для обеспечения большей герметичности в условиях повышенной влажности в отсек печатного узла заливается компаунд Пентэласт-712, между печатным узлом и крышкой наносится силиконовый герметик Masterteks НМ.

В ходе экспериментальных исследований смонтированный корпус, внутрь которого были помещены бумажные индикаторы влажности, был погружен в воду на глубину 1 м на 24 ч. В результате проведения эксперимента было установлено, что конструкция разработанного корпуса, а также технология герметизации и монтажа соответствуют требованиям герметичности IP67.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лодяев В.В., Лисихин К.В. Устройство регистрации активности крупного рогатого скота // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: матер. рег. науч.-прак. конф., Томск, 2018. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2018. – С. 113–116.

2. ГОСТ 14254–2015 (IEC 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP).

3. Способы изготовления корпусов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mash-xxl.info/info/626059/ (дата обращения: 02.03.2020).

УДК 658.512.26, 621.3.049.7

МАКЕТ УСТРОЙСТВА ПРЕЦИЗИОННОГО ДОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАСТ

К.С. Колесов, С.А. Рамазанова, И.П. Шарков, студенты каф. КУДР

Научный руководитель С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, kostyank7@gmail.com

Рассматриваются вопросы разработки устройства для нанесения паст высокой вязкости. Данное устройство позволяет реализовать технологию принтерной печати проводящими, диэлектрическими и резистивными пастами.

Ключевые слова: шнек, дозатор, аддитивные технологии, функциональные пасты, шаговый двигатель.

Современный процесс изготовления компонентов и узлов электроники предполагает использование большого числа различных технологических операций для получения рисунка (топологии) функциональных слоев. Технология трафаретного изготовления толстопленочных схем широко распространена на предприятиях радиоэлектронной промышленности [1]. Суть технологии состоит в последовательном нанесении функциональных паст через предварительно изготовленные шаблоны, с последующим запеканием в высокотемпературных печах.

Недостатком такой технологии являются необходимость изготовления физических шаблонов, а именно высокие временные затраты при отладке первых партий, потери функциональных паст, сложность изготовления многослойных СВЧ ГИС, высокая себестоимость подготовки производства для изготовления прототипов. В связи с этим предлагается провести исследование, направленное на создание отечественной технологии изготовления узлов электроники, свободной от перечисленных недостатков. Использование аддитивных технологий, в частности технологии принтерной печати, позволяет существенно сократить число технологических операций, тем самым упростив технологию производства и, как следствие, себестоимость конечного изделия.

Такая технология предполагает процесс нанесения заданного объема пасты на основание в соответствии с шаблоном требуемой топологии, с требуемой точностью и высокой повторяемостью.

В данной работе разрабатывается устройство для нанесения заданного объема пасты. Для обеспечения прецизионного дозирования будет реализована шнековая подача пасты [2] через дозирующую иглу (сопло) с калиброванным диаметром выдающего отверстия. Диаметр выдающего отверстия иглы закладывает базовое значение ширины линии. Движение функциональной пасты из емкости к шнековому дозатору будет осуществляться за счет пневматического воздействия. Структурная схема такой установки представлена на рис. 1 [3].

Пневматическая система позволяет создавать первичное давление функциональных паст для эффективного применения шнекового дозатора на выходе, для использования функциональных паст с вязкостью более 100 сП.

Для вращения шнека в дозаторе используется шаговый электродвигатель с редуктором – это синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками. Последовательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения ротора.

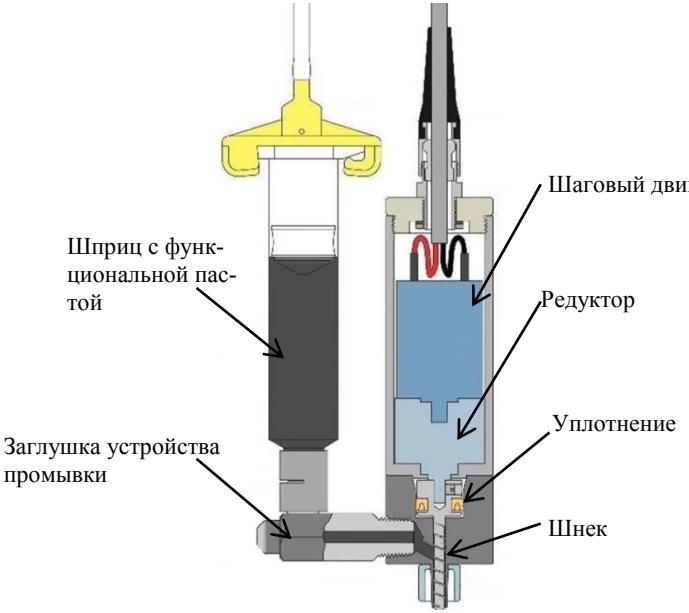


Рис. 1. Шнековый дозатор

Разрабатываемая дозирующая головка в составе принтерной системы печати позволит осуществлять контролируемое дозирование особо вязких паст для изготовления функциональных слоев (проводящих, резистивных, диэлектрических) гибридных интегральных схем. Модель такой установки представлена на рис. 2.

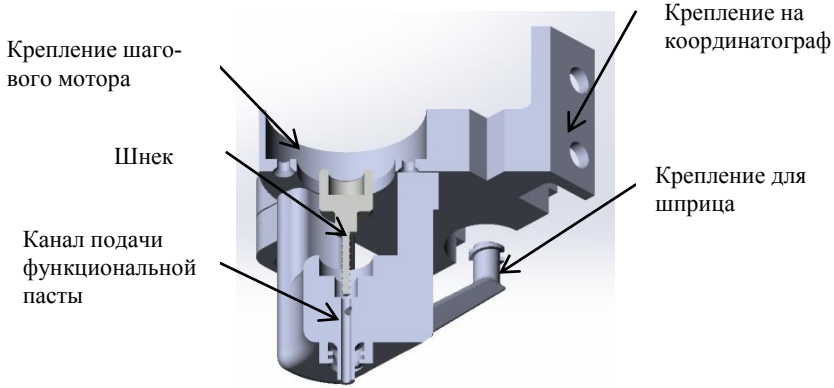


Рис. 2. Модель шнекового дозатора

В качестве основы для установки шнекового дозатора и проведения первичных испытаний системы дозирования паст был выбран координатограф от 3D-принтера, DoesBot-D1.

Разработанный макет дозатора позволяет выполнять эксперименты по нанесению функциональных паст различной вязкости. На следующем этапе работы будет усовершенствован макет и будет проведен анализ возможности печати пастами, которые используются в трафаретной технологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках выполнения договора № 344ГУЦЭС8-D3/56678, по программе УМНИК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология трафаретного изготовления толстопленочных схем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.agalsea.ru/old/articles/9.html (дата обращения: 08.01.2020).

2. Шарков И.П., Колесов К.С. Проектирование шнекового микродозатора проводящих паст // VIII рег. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 2019 г. – Ч. 2. – С. 695–698.

3. Головки дозирования Nordson Asymtek [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://deal.by/p46573799-golovki-dozirovaniya-nordson.html (дата обращения: 09.11.2019).

УДК 004.38

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

В.С. Ваняшин, магистр каф. ЭМИС

Научный руководитель Е.А. Шельмина, доцент каф. ЭМИС, к.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, mr.vaniaschin@yandex.ru

Проведены обзор и сравнительный анализ микропроцессоров. Рассмотрены основные характеристики и области применения микропроцессоров. Выделены критерии сравнения.

Ключевые слова: микропроцессор, процессор, интегральные схемы, однокристальные микропроцессоры, многокристальные микропроцессоры, тактовая частота, разрядность процессора.

Целью данной работы является изучение различных видов микропроцессоров для сравнительного анализа по области применения и характеристикам.

Микропроцессор – инженерное устройство, выполняющее процесс манипулирования над различными типами информации, расположенное на интегральных схемах [1].

Основное отличие микропроцессоров от различных цифровых устройств заключается в способе обработки информации [2].

Микроконтроллер – микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Отличается от микропроцессора интегрированными в микросхему устройствами ввода-вывода, таймерами и другими периферийными устройствами.

Также существует микропроцессорный набор – это сборка совместимых для взаимодействия микросхем. В процессе развития микропроцессорной техники были выявлены два основных вида направлений (таблица). Они должны работать друг с другом по множеству технологий и иметь полноценную совместимость по таким характеристикам, как электросовместимость, возможность конструкции, и архитектуре [3].

Направления микропроцессорной техники

Направление	Описание
Однокристальные	Все элементы процессора размещаются в одной интегральной схеме, при этом разрядность обрабатываемых слов составляет размер одного байта, а система команд является заданной
Многокристальные	Все элементы процессора размещаются на нескольких интегральных схемах, расположенных на одной плате

Arduino. Из-за значительного введения микропроцессоров различные разработчики начали плодотворное развитие технологий в данном направлении, так, свет увидел популярный микроконтроллер Arduino.

Arduino – это небольшая плата, оснащенная процессором и памятью. Программная часть данной платы состоит из бесплатной программируемой оболочки для написания программ, их компиляции и последующей работы аппаратуры. Аппаратная часть же представляет собой набор соединённых печатных плат, продающихся в различных видах, а также доступных от официального производителя или от иных фирм и компаний. Полностью открытая архитектура системы позволяет с легкостью модифицировать и управляться с данной продукцией.

В микроконтроллер Arduino непосредственно введена возможность загрузки программы, которая будет заниматься менеджментом и контролированием всех устройств под определенным, заранее заданным алгоритмом. Тем самым имеется возможность произвести огромное количество уникальных и непохожих устройств, ограниченных лишь воображением разработчика.

Raspberry Pi. Также из-за развития микропроцессоров прогресс в области мини-компьютеров претерпел значимые изменения, так, был разработан один из самых популярных одноплатных компьютеров.

Raspberry Pi – представляет собой одноплатный компьютер, тем самым имея различные части компьютера, которые располагаются на одной плате небольшого размера и имеющей отличительные характеристики, несмотря на небольшой размер.

Raspberry и Arduino – дуэт, позволяющий производить при достаточно малых ресурсах полноценные устройства, в которых имеется продуманная и рабочая инженерная логика.

В качестве примера выступает электронная машина с реализацией компьютерного зрения. Так, контроллером двигателей в данном случае выступает плата Arduino с приставкой Nano, обеспечивающая отличную скорость и точность в управлении двигателя.

Для вычисления движения машины по принципу «компьютерного зрения» в качестве главного контроллера взят Raspberry Pi с приставкой B+. Его программа реализована на языке программирования Python, который является стандартным для операционной сети данного контролера, а также оснащен камерой, которая поддерживается данными платами.

В итоге за счет деления производительных инструкций между Raspberry и Arduino достигается высокая скорость отклика системы.

На базе одноплатного компьютера Raspberry Pi разрабатываются стабильные и имеющие хорошую производительность устройства, которые используются в различных отраслях: промышленные компьютеры, автоматизированные системы, медиа или веб-серверы, беспроводные точки доступа, программируемые роботы в инженерии и имеющие огромный потенциал в среде интернета вещей. Разрабатываемые устройства или среда применения ограничивается лишь навыком разработчика, который пользуется Raspberry Pi, тем самым открывая огромный набор различных сценариев во время программирования или разработки устройств [4].

Выводы. Рассмотренные микропроцессорные технологии были определены по практической значимости. Кроме того, главным критерием выбора данных технологий стала возможность производить синергию между двумя компонентами в любом виде технологии для практического применения.

По итогу выделены Arduino и Raspberry Pi, так как они имеют хорошее сочетание при разработке различных инженерных технологий, а также популярны, тем самым имеют постоянные обновления и поддержку в программной части.

Так, дальнейшим этапом становится программирование подходящего программного скрипта и проектирование логики прикладной части будущего устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванько А.Ф. Мобильные микропроцессоры / А.Ф. Иванько, П.С. Афанасьев // Вестник МГУП им. Ивана Фёдорова. – 2015. – Т. 1. – С. 1–3.

2. Каршенбойм И. Квадрига Аполлона и микропроцессоры // Компоненты и технологии. – 2006. – Т. 1. – С. 102–106.

3. Чаусов М.В., Учебная модель микропроцессора / М.В. Чаусов, С.С. Смирнов, С.М. Чаусова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2009.

4. Маликов К.Б. Перспективы развития микропроцессоров // Научный журнал. – 2018. – Т. 1. – С. 1–7.

5. Слончак И.А. Российские Микропроцессоры // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – С. 1–2.

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – **Троян П.Е.**, зав. каф. ФЭ, д.т.н., проф.;*
*зам. председателя – **Смирнов С.В.**, проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

УДК 537.525

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ЕЕ СВОЙСТВА

А.Е. Петров, студент; В.Т. Чан, аспирант каф. физики
Научный руководитель А.С. Климов, проф. каф. физики, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, a.e.petrov_job@mail.ru

Проведено спекание электронным пучком образцов металлокерамики на основе порошков оксида алюминия и титана в зависимости от скорости их нагрева. Показано, что высокая скорость нагрева приводит к образованию пор на облучаемой поверхности. Определена скорость нагрева, позволяющая получать однородно спеченный образец.
Ключевые слова: электронно-лучевое спекание, композиционная керамика, металлокерамика.

Керамические материалы применяются во многих отраслях техники, где подвергаются экстремальным воздействиям механической нагрузки и температуры. Поэтому керамике особо важно иметь высокие показатели прочности в широком диапазоне температур. Одним из перспективных керамических материалов является оксид алюминия, обладающий сочетанием высокой твердости, термостойкости и химической инертности. Однако при спекании этот материал имеет неоднородную крупнозернистую структуру, что приводит к низким значениям твердости и высокой чувствительности к абразивному износу, и, как следствие, ограничивает область применения данной керамики [1]. В связи с этим возникла задача создания композиционной керамики с улучшенными характеристиками, чего можно добиться путем добавления различных материалов с более высокой пластичностью. Таким материалом может выступать титан, обладающий относительной легкостью и пластичностью.

Цель данной работы – изучение влияния скорости нагрева при электронно-лучевом спекании композиционного материала Al_2O_3/Ti на морфологию его поверхности и плотность.

Эксперимент проводился в форвакуумной области давлений, в качестве образцов были спрессованы четыре образца в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 3 мм. Данные образцы подвергались электронно-лучевой обработке при температуре 1600 °С. Время нагрева до заданной температуры составляло 1 мин – образец № 1, 5 мин – образец № 2, 10 мин – образец № 3 и 20 мин – образец № 4, после чего образцы выдерживались при данной температуре в течение 10 мин и остужались.

После электронно-лучевой обработки образцов были определены их параметры, а также рассчитана плотность. Полученные значения занесены в таблицу.

Параметры образцов до и после спекания

Al_2O_3 + Ti								
Время нагрева	1 мин		5 мин		10 мин		20 мин	
	До	После	До	После	До	После	До	После
Масса, мг	445	428	497	485	499	480	463	424
Объем, мм^3	227	214	251	216	245	215	233	189
Плотность, г/см^3	1,96	2,00	1,98	2,24	2,04	2,23	1,98	2,27

Как можно видеть из таблицы, плотность образца № 1 после быстрого нагрева в течение 1 мин изменилась незначительно. Для остальных образцов плотность после спекания повысилась на 13% и практически не зависит от скорости нагрева.

На рис. 1, 2 представлены фотографии облученной *а* и необлученной *б* поверхности образцов № 1 и 4 после спекания.

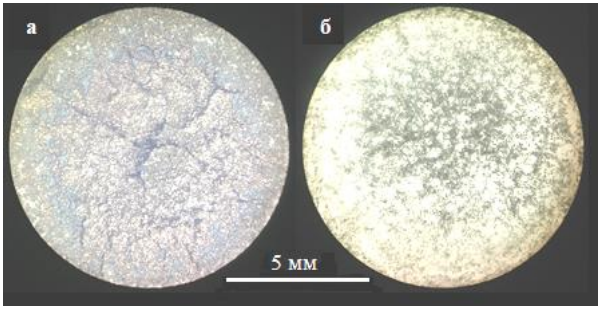


Рис. 1. Фотография поверхности образца № 1:
облученной – *а*; необлучённой – *б*

Анализируя полученные режимы и фотографии поверхности, можно сказать, что при нагреве в течение 1 мин поверхность образца № 1 теряет однородность и на ней появляются сколы и отслоения (см.

рис. 1, *а*). Очевидно, что это связано с высокой скоростью нагрева и соответственно возникающими при этом высокими градиентами температуры по глубине образца.

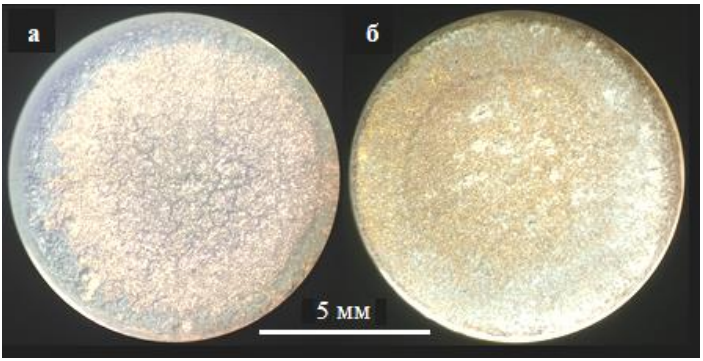


Рис. 2. Фотография поверхности образца № 4:
облученной – *а*; необлучённой – *б*

Обратная сторона этого же образца практически не изменилась (см. рис. 1, *б*), что говорит о недостаточном времени для спекания. Несмотря на то, что для всех образцов время выдержки при температуре спекания было одинаково, очевидно, имеет значение и полная энергия, передаваемая образцу за весь процесс спекания. С ростом скорости нагрева эта энергия уменьшается, и ее оказывается недостаточно для спекания всего образца. С увеличением времени нагрева трещины на поверхности пропадают (см. рис. 2, *а*), а обратная сторона образца (см. рис. 2, *б*) становится более темной за счет частичного расплавления титана.

Заключение. Показана возможность получения металлокерамического композитного материала, состоящего из порошковой смеси оксида алюминия и титана. Результат спекания зависит не только от температуры изотермической выдержки, но и полной энергии электронного пучка, затраченной на спекание.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для докторов наук, соглашение № 075-15-2019-372.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдин М.С., Сахаров Н.В., Шотин С.В. и др. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания, для трибологических применений // Вестник нижегородского ун-та им Н.И Лобачевского. – 2012. – № 6(1). – С. 32–37.

УДК 776

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Д.А. Гринько, студент каф. ФЭ

Научный руководитель И.А. Чистоедова, к.т.н., каф. ФЭ

г. Томск, ТУСУР, grinkoda.98@gmail.com

Проект ГПО ФЭ-1304 «Технология и формирование наноструктур»

Представлена оценка влияния технологических режимов на разрешающую способность контактной фотолитографии. Определены технологический режим этапа нанесения позитивного фоторезиста S1818, оптимальная доза экспонирования и рецепты травителей для пленок меди и алюминия.

Ключевые слова: фотолитография, фоторезист, экспонирование, травление, разрешающая способность.

Фотолитография в микроэлектронике – это метод формирования топологического рисунка микросхемы на поверхность подложки при помощи облучения фоторезистивного материала через маску [1]. Задача фотолитографии – обеспечить качественное формирование минимальных элементов на всем поле пластины с соблюдением допускаемых отклонений размеров элементов [2].

Основной целью работы является исследование влияние технологических режимов нанесения позитивного фоторезиста S1818, экспонирования и травления на разрешающую способность прямой контактной фотолитографии.

Для повышения качества наносимых покрытий необходимо удалить имеющуюся на подложке пленку загрязнений, т.е. очистить поверхность. В данной работе керамические подложки марки 22ХХС предварительно были обработаны в химических растворах:

1) в 6%-ном растворе KOH в течение 20 мин;
2) в растворе H_2O_2:NH_4SO_4:H_2O=(0,5:2:10) в течение 20 мин.

На обработанные подложки методом центрифугирования наносили позитивный фоторезист S1818, при этом изменяли число оборотов (ω = (500–4000) об/мин).

На рис. 1 представлена зависимость толщины фоторезиста от количества оборотов центрифуги.

Анализ результатов эксперимента показал, что наиболее технологичным решением является использование режима нанесения на центрифуге, соответствующего 3000 об/мин. При данном режиме толщина фоторезиста, равная 1,96 мк*м*, соответствует техническим условиям, приведенным в паспорте фоторезиста S1818 [3].

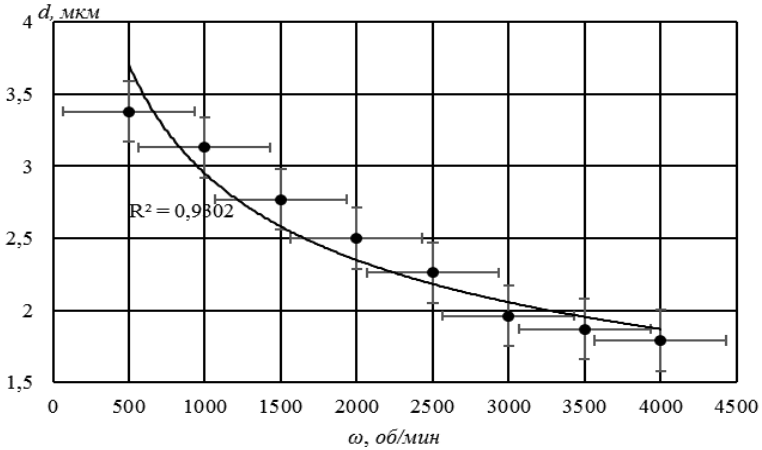


Рис. 1. Зависимость толщины слоя фоторезиста S1818
от количества оборотов центрифуги

Далее подложки с нанесенным фоторезистом экспонировали в установке СТ-301 в течение времени от 10 до 150 с, фоторезист проявляли в растворе 1,2% KOH. Для определения оптимальной дозы экспонирования была получена характеристическая кривая (рис. 2).

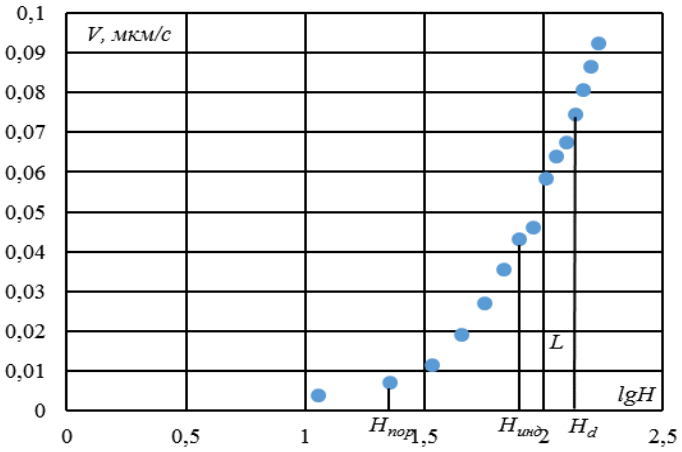


Рис. 2. Зависимость скорости проявления от дозы экспонирования

К характерным точкам данной зависимости относятся: пороговая светочувствительность, обратная дозе экспонирования, при которой скорость проявления облученных участков асимптотически прибли-

жается к скорости растворения необлученных участков; фотографическая ширина – диапазон экспозиций, в пределах которого скорость проявления растет пропорционально дозе облучения. Таким образом, пороговая чувствительность позитивного фоторезиста S1818 составила 0,00443 см^2/(мВт·с), а фотографическая ширина составила (79,1–135,6) мДж/см^2. Можно сделать вывод, что для наиболее точного воспроизведения элементов изображения целесообразно экспонировать фоторезист S1818 дозой от 79,1 до 135,6 мДж/см^2, при этом время экспонирования составит 70–120 с.

Для оценки химической стойкости фоторезиста S1818 проводилось травление рабочего слоя меди и алюминия и оценивалась величина бокового подтрава. В качестве травителей для меди использовались следующие растворы:

1) $HNO_3{:}H_2O = 2:1$;
2) $H_2SO_4{:}HCl{:}HNO_3{:}\text{сажа} = 100:2:100:1$;
3) $HNO_3{:}H_2SO_4{:}HCl = 50:50:1$;
4) $HNO_3(20\%){:}H_2SO_4 = 2:1$.

Эксперимент показал, что при травлении образцов в растворах 2 и 3 наблюдается полное удаление поверхности медной пленки. Следовательно, использовать данные растворы при травлении пленок меди не рекомендуется. При травлении в растворе 1 погрешность воспроизведения рисунка составила 3%, а в растворе 4 – 4,7%. Таким образом, для травления пленок меди рекомендуется использовать травитель $HNO_3{:}H_2O = 2:1$.

Для травления алюминия использовались следующие рецепты травителей: азотная кислота (HNO_3) и $CrO_3\,(30\text{ г/л}){:}H_2SO_4\,(150\text{ г/л})$.

Эксперимент показал, что при травлении алюминия в растворе азотной кислоты погрешность воспроизведения рисунка составила 1,3%, а в растворе $CrO_3\,(30\text{ г/л}){:}H_2SO_4\,(150\text{ г/л})$ – 2,7%. Таким образом, для травления пленок алюминия рекомендуется использовать азотную кислоту (HNO_3).

Для реализации процесса контактной фотолитографии на базе кафедры физической электроники были определены технологические режимы, влияющие на разрешающую способность воспроизведения топологии рисунка. Рекомендуется проводить нанесение позитивного фоторезиста S1818 на центрифуге при 3000 об/мин, экспонировать фоторезист дозой от 79,1 до 135,6 мДж/см2. Для травления пленок меди использовать раствор $HNO_3{:}H_2O = 2:1$, а алюминия – азотную кислоту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулыгин Д.А. Фотолитография в полупроводниковой промышленности // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Технологии XXI века: проблемы и перспективы развития». – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 137–139.

2. Трапашко Г. Контроль микроразмеров в производстве ИС // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2011. – № 3. – С. 96–103.

3. ST 2378-015-29135749-2015. Серия позитивных фоторезистов MICROPOSIT S1813, S1818, S1828. Технические условия. – М.: Фраст-М, 2015. – 10 с.

УДК 537.563

УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОМ МИШЕНИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМЕ

К.И. Карпов, студент

Научный руководитель В.А. Бурдовицин, проф. каф. физики, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, burdov@fet.tusur.ru

Проект ГПО ЭП-1201 «Генерация плазменными катодами электронных пучков и их применение»

Представлены результаты измерения плавающего потенциала изолированной мишени, облучаемой электронным пучком в диапазоне давлений 1–3 Па. Показано, что одна из возможностей управления указанным потенциалом заключается в размещении мишени в металлическом стакане и подаче напряжения на стакан относительно заземленных стенок вакуумной камеры.

Ключевые слова: форвакуумный электронный источник, электронный пучок, изолированная мишень, потенциал мишени, управление потенциалом мишени.

Одно из распространенных применений электронных пучков состоит в модификации поверхностных свойств различных материалов, в том числе диэлектрических [1]. Однако при облучении диэлектриков возникает специфическая проблема, заключающаяся в накоплении заряда, приносимого электронным пучком, и понижении потенциала поверхности диэлектрика до значений, сопоставимых с напряжением, ускоряющим частицы в электронном источнике [2]. Существенного ослабления остроты проблемы удается достичь использованием так называемых форвакуумных электронных источников [3], способных формировать электронные пучки в диапазоне давлений 1–100 Па, поскольку образующаяся при прохождении электронного пучка плазма становится поставщиком положительных ионов, частично компенсирующих электронный заряд. Вместе с тем в условиях верхних давлений из указанного диапазона имеет место существенное рассеяние

пучка, в связи с чем приходится использовать низкие давления и находить иные способы предотвращения понижения потенциала мишени. Настоящая работа посвящена исследованию одного из таких способов.

Исследования проводились на установке, схематически изображенной на рис. 1. Основные элементы: плазменный электронный источник *1*, фокусирующая система *2*, формирующая пучок *3*, металлический стакан *4*. В качестве модели диэлектрической мишени использовалась изолированная титановая мишень *5*, потенциал φ которой и ток I_b в ее цепи измерялись соответствующими приборами. Напряжение U_c на стакан подавалось от выпрямителя. Энергия электронного пучка определялась напряжением U_a, приложенным к ускоряющему промежутку. Суть эксперимента состояла в измерении потенциала φ мишени в зависимости от напряжения U_c на стакане. Регулировка давления в камере *6* осуществлялась напуском аргона с использованием натекателя.

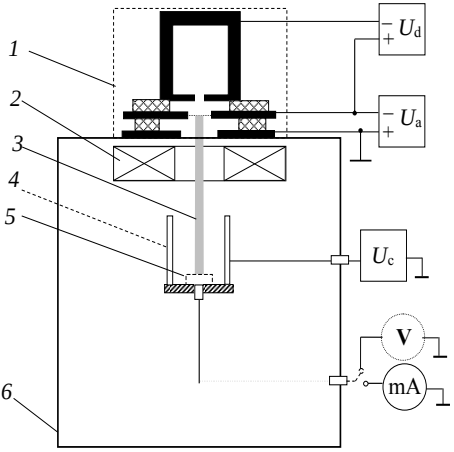
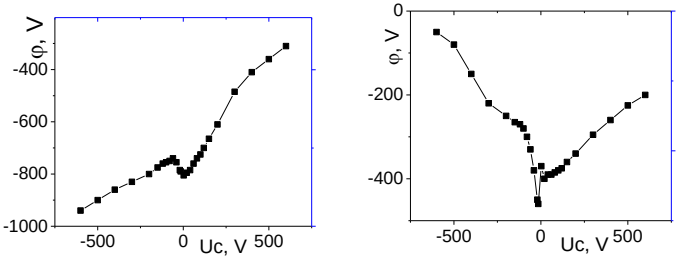


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки

Результаты измерений (рис. 2) сводятся к следующему. Подача на стакан напряжения U_c, положительного относительно заземленных стенок камеры, вызывает повышение потенциала φ мишени. Поведение потенциала φ при подаче на стакан отрицательного напряжения определяется давлением газа. При давлениях, меньших 3 Па, потенциал φ снижается по мере возрастания отрицательного напряжения на стакане (рис. 2, *а*). При больших давлениях зависимость меняется на противоположную (рис. 2, *б*). Выполненные параллельно визуальные наблюдения показали, что в случае больших давлений повышение

потенциала мишени сопровождается возрастанием яркости свечения плазмы в стакане, в то время как при низких давлениях одновременно со снижением потенциала наблюдается выталкивание плазмы вверх из стакана.

Указанные результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Скорость поступления отрицательного заряда на мишень определяется пучком и не зависит от потенциала стакана. Следовательно, все наблюдаемые изменения вызваны ионными потоками. При положительных U_c, равно как и при отрицательных U_c, в случае больших давлений имеет место увеличение плотности плазмы в стакане, сопровождающееся возрастанием потока ионов на мишень и повышением ее потенциала. Напротив, при отрицательных U_c в случае низких давлений возрастание толщины пристеночного слоя пространственного заряда вызывает выталкивание плазмы и, как следствие, снижение потока ионов на мишень. Таким образом, подача напряжения на стакан представляет собой эффективный способ управления потенциалом изолированной мишени.



а *б*

Рис. 2. Потенциал мишени φ как функция напряжения U_c на стакане при разных давлениях: *а* – 1,5 Па; *б* – 3 Па; U_a = 3,5 кВ; I_b = 1,5 мА

ЛИТЕРАТУРА

1. Xu H., Hu J., Ma C., Chai L., Guo N. Influence of Electron Beam Irradiation on Surface Roughness of Commercially AISI 5140 Steel // Materials Transactions. – 2017. – Vol. 58, Is. 11. – P. 1519– 1523.

2. Евстафьева Е.Н., Зайцев С.В., Рау Э.И., Татаринцев А.А. Зависимость потенциала зарядки диэлектриков и изолированных проводников от угла падения пучка электронов // Вестник Моск. ун-та. – Сер. 3: Физика. Астрономия. – 2014. – № 1. – С. 56–60.

3. Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком, генерируемым форвакуумным плазменным источником // Перспективные материалы. – 2011. – № 6. – С. 77–82.

УДК 521.315.82.2

ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

А.А. Климов, студент каф. ЭП
Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, ygt.art@gmail.com

Изложен подход к составлению вольт-амперной характеристики (ВАХ) гетероструктуры с квантовыми ямами, основанный на доминировании при прямых смещениях надбарьерного тока диффузии основных носителей заряда, распадающегося на сквозной ток и инжекционные токи в квантовые ямы. Показано, что ВАХ гетероструктуры с квантовыми ямами может быть представлена как сумма двух структурно аналогичных ВАХ с экспоненциальной зависимостью тока от смещения, одна из которых аналогична характеристике диффузионного перехода, а вторая описывает токоперенос с захватом и эмиссией носителей заряда квантовыми ямами.
Ключевые слова: гетероструктура, квантовая яма, вольт-амперная характеристика.

Одним из важных параметров, определяющих эффективность работы светодиодной гетероструктуры (ГС), является ток инжекции носителей заряда в квантовые ямы (КЯ). От понимания механизмов его формирования, а также причин, определяющих уровень тока инжекции носителей заряда в *n*-КЯ и *p*-КЯ, зависят люминесцентные свойства, коэффициент полезного действия ГС и другие важные параметры источника оптического излучения [1].

Существующие работы об особенностях формирования и протекания тока в гетероструктуре с множественными КЯ (МКЯ) направлены в основном на выяснение причин снижения эффективности свечения ГС при больших значениях прямых токов [2, 3], при этом механизм протекания тока в ГС отожествляется с механизмом протекания тока в диффузионном *p*–*n*-переходе, в большинстве своем игнорируя влияние, оказываемое КЯ. Как результат этого вопросы природы тока, его формирования в присутствии МКЯ, взаимного влияния на инжекцию в КЯ остаются изученными недостаточно, в частности, вопросы инжекции носителей заряда в квантовую яму и их эмиссии из квантовой ямы. Также отсутствуют работы по получению аналитического выражения для ВАХ гетероструктуры с множественными квантовыми ямами.

Цель данной работы – построение физико-математической модели токопротекания в ГС с МКЯ, а также получение ВАХ гетероструктуры в приближении, допускающем ее аналитическую форму записи.

Токоперенос в диффузионном *p–n*-переходе. Полный ток *p–n*-перехода без КЯ представляет собой сумму прямого и обратного токов, причем в большинстве случаев обратный ток является диффузионным током неосновных носителей заряда из эмиттеров. При прямых смещениях ток через переход представляет собой диффузионный ток основных носителей $I_{\text{осн}}$, ограниченный барьером высотой

$$\phi_b = (kT/q)\cdot \ln\left(N_d N_a / n_i^2\right).$$

Тогда прямой ток, ограниченный барьером, будет равен

$$I_{\text{main}}\cdot \exp(-q\phi_b/kT) = q\left(\sqrt{D_n/\tau_n}\,n_n + \sqrt{D_p/\tau_p}\,p_p\right)\cdot \exp(-qV/kT).$$

Подставив сюда выражение для барьера, в стандартных обозначениях получим

$$I_{\text{main}}\cdot \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) = qS\cdot\left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}N_d + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}N_a\right)\times$$

$$\times\left(\frac{n_i^2}{N_d N_a}\right) = qS\cdot\left(\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\cdot n_p + \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\cdot p_n\right) \equiv I_0,$$

т.е. надбарьерный прямой ток равен обратному току. Это обстоятельство дает право записать выражение для ВАХ диффузионного *p–n*-перехода в виде:

$$I(V) = I_0\cdot\left[\exp(qV/kT) - 1\right].$$

Именно это выражение используют многие исследователи, анализируя токоперенос в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами.

Токоперенос в ГС с МКЯ. Рассматривая ее энергетическую диаграмму на рис. 1, можно видеть, что в ГС с МКЯ, как и в случае диффузионного *p–n*-перехода, имеется обратный ток $I_0 = I_0^{(n)} + I_0^{(p)}$, диффузионные токи с эмиттеров электронов $I_{\text{dif}}^{(n)}$ и дырок $I_{\text{dif}}^{(p)}$, ограниченные потенциальным барьером, а также ток основных носителей между эмиттерами, называемый сквозным током $I_{thr}^{(b)}$. Его особенностью является то, что он не взаимодействует с квантовыми ямами. Дополнительными токами в структуре с МКЯ являются два тока, характеризующиеся взаимодействием с квантовыми ямами. Это токи инжекции электронов и дырок в *k*-е *n*- и *p*-КЯ – $I_{k\,inj}^{(qw)}$, а также сквоз-

ные токи электронов и дырок $I_{k\ thr}^{(qw)}$, которые возникают за счет термоэмиссии носителей из КЯ в вещество барьерного слоя.

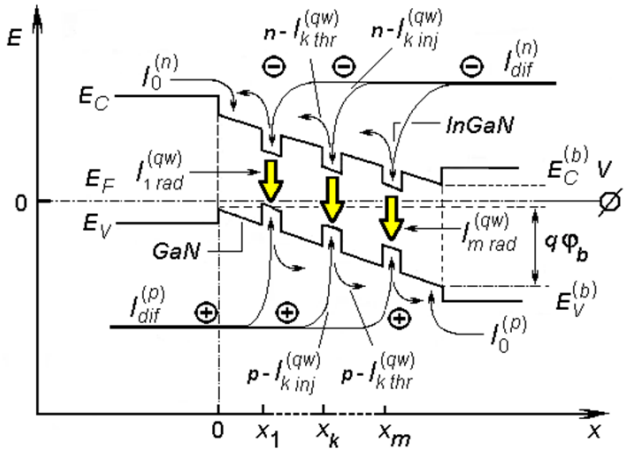


Рис. 1. Схема протекания токов в ГС с МКЯ

Эти токи связаны между собой: $I_{k\ inj}^{(qw)} = I_{k\ rad}^{(qw)} + I_{k\ thr}^{(qw)}$, где $I_{k\ rad}^{(qw)}$ – ток, расходуемый на излучательную рекомбинацию в *k*-х квантовых ямах. Таким образом, полный ток основных носителей заряда в ГС с числом квантовых ям, равным *m*, будет

$$I_{\text{main}}(V) = \sum_{k=1}^{m} I_{k\ rad}^{(qw)}(V) + \sum_{k=1}^{m} I_{k\ thr}^{(qw)}(V) + I_{thr}^{(b)}(V).$$

Ток инжекции. Он представляет собой ток, протекающий через ГС и расходуемый на заполнение носителями заряда КЯ для электронов и КЯ для дырок. Если рассматривать ГС с числом квантовых ям, равным расположенным в ОПЗ с периодом трансляции *d*, то для попадания в *k*-ю *n*-КЯ электрону надо преодолеть барьер

$$\phi_k = \phi_b - \left[qn_n^0 / (2\varepsilon_b \varepsilon_0) \right] d^2 \cdot (m-k)^2.$$

Тогда полный ток через ГС можно представить в следующем виде:

$$I_{GS}(V) = I_{thr}^{(b)}\left(V, n_{thr}^{(b)}, p_{thr}^{(b)}\right) + I_{thr}^{(qw)}\left(V, n_{thr}^{(qw)}, p_{thr}^{(qw)}\right) + I_{inj}^{(qw)}\left(V, n_{inj}, p_{inj},\right) - I_0,$$

где ток инжекции и сквозные токи из КЯ зависят следующим образом:

$$I_{k\ inj}^{(qw)}(V) = I_{k\ dif}^{(qw)}(V) \cdot \exp(-q\phi_k / kT).$$

Суммируя сказанное, можно записать выражение для ВАХ ГС с МКЯ в виде

$$I_{GS}(V)=\eta_{thr}^{(b)}\cdot\left[I_{thr}^{(b)}\left(n_n^0,p_p^0\right)\cdot\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)-I_0\right]+\eta_{inj}^{(qw)}\cdot\left[I_{inj}^{(qw)}\left(n_n^0,p_p^0\right)\cdot\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)-I_0\right],$$

где $\eta_{inj}^{(qw)}$ и $\eta_{thr}^{(b)}$ – параметры, описывающие вклады различных механизмов токопротекания в гетероструктуре с взаимодействием и без взаимодействия с КЯ соответственно, причем

$$\eta_{thr}^{(b)}+\eta_{inj}^{(qw)}=1\,.$$

Выводы. Доказана неприменимость выражения для ВАХ диффузионного перехода к описанию токопроводящих свойств гетероструктуры с МКЯ. Предложен подход к описанию ВАХ гетероструктуры с МКЯ, основанный на представлении полного тока через ГС в виде двух токов, различающихся их взаимодействием с квантовыми ямами: надбарьерного сквозного тока в сумме со сквозным током через КЯ, а также тока излучения МКЯ.

Выведена структура выражения для ВАХ-гетероструктуры, представляющая собой сумму двух ВАХ, структурно подобных ВАХ диффузионного *p*–*n*-перехода, и компонент полного тока, входящих в ВАХ со своими весовыми коэффициентами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schubert E.F. Light-Emitted Diodes. – Cambridge, 2006. – 436 p.

2. Бочкарева Н.И., Тархин Д.В., Ребане Ю.Т. и др. Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN // ФТП. – 2007. – Т. 41, № 1. – С. 88–95.

3. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Влияние хвостов локализованных состояний в InGaN на уменьшение эффективности GaN-светодиодов с ростом плотности тока // ФТП. – 2012. – Т. 46, № 8. – С. 1054–1062.

УДК 537.525.5

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В ФОРВАКУУМНОМ ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ

А.В. Казаков, доцент; А.С. Кузьмин, студент; А.В. Медовник, доцент

г. Томск, ТУСУР, каф. физики, andrykazakov@gmail.com

Представлены исследования особенностей функционирования контрагированного дугового разряда в разрядной ячейке импульс-

ного форвакуумного источника электронного пучка большого радиуса. Установлено, что напряжение горения контрагированной дуги увеличивается при увеличении тока разряда и при уменьшении давления газа.
Ключевые слова: контрагированный дуговой разряд, форвакуумный диапазон давлений, плазменный источник электронов.

Рабочие характеристики плазменных источников электронов во многом определяются параметрами эмиссионной плазмы, для генерации которой используются различные типы разрядов [1, 2]. В частности, для генерации эмиссионной плазмы используется дуговой разряд с катодным пятном, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами разрядов [3]. Однако дуговой разряд с катодным пятном имеет недостатки, связанные с хаотичным перемещением катодного пятна и формированием потока макрочастиц материала катода, который может проникать в область ускорения и транспортировки пучка. Для уменьшения влияния процессов, связанных с функционированием катодного пятна, применяется контрагированный дуговой разряд [4, 5]. Обычно для контрагирования разряда используется вспомогательный электрод между катодом и анодом. Данный электрод имеет контрагирующее отверстие диаметром 2–6 мм и находится под «плавающим» потенциалом, т.е. он изолирован от других электродов. Параметры и особенности функционирования контрагированного дугового разряда достаточно хорошо исследованы для плазменных источников, функционирующих в стандартном диапазоне давлений 10^{-3}–10^{-1} Па [4, 5]. Однако применение данного типа разряда для генерации эмиссионной плазмы в форвакуумных источниках ранее не исследовалось. Поэтому цель работы заключается в исследовании параметров контрагированного дугового разряда, функционирующего в разрядной ячейке форвакуумного импульсного источника электронного пучка большого радиуса.

Методика эксперимента. Схематичное изображение разрядного промежутка для исследования контрагированного дугового разряда представлено на рис. 1. Катодный узел, который состоит из медного катода (диаметр 6 мм) *1*, изолятора *2* и поджигающего электрода *3*, установлен на объемном изоляторе *4*, в котором имеются токовводы *5* и *6* для подключения электродов. Контрагирование дугового разряда осуществляется вспомогательным (контрагирующим) электродом *7*, в котором выполнено контрагирующее отверстие диаметром 2,8 мм. Контрагирующий электрод *7* электрически изолирован от анода *8* с помощью изолятора *9*. Анод (нержавеющая сталь) диаметром 114 мм и высотой 150 мм имеет эмиссионное окно, которое перекрыто сеткой

из нержавеющей стали. Разрядный промежуток размещался на вакуумной камере. Откачка камеры осуществлялась форвакуумным насосом. Давление p газа (азот) в экспериментах изменялось в диапазоне 5–15 Па. Контрагированный дуговой разряд питался с помощью импульсного блока питания *10*. Измерение тока разряда I_d осуществлялось с помощью трансформатора тока, а напряжение U_d горения дуги – с помощью делителя напряжения. Длительность импульса в экспериментах составляла 100 мкс.

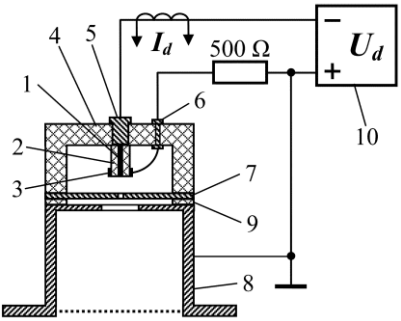


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – катод; *2* – керамический изолятор; *3* – поджигающий электрод; *4* – изолятор; *5* и *6* – токовводы; *7* – контрагирующий электрод; *8* – анод; *9* – изолятор; *10* – импульсный блок питания разряда

Результаты экспериментов и их анализ. На рис. 2 представлены осциллограммы тока I_d и напряжения U_d горения контрагированного дугового разряда, функционирующего в разрядной ячейке форвакуумного плазменного источника. По осциллограммам видно, что напряжение U_d горения увеличивается в течение импульса, а ток разряда I_d уменьшается. Наблюдаемое в настоящей работе изменение напряжения U_d и тока I_d в течение импульса, вероятно, как и в работах [4, 5], обусловлено «электронной откачкой» газа из катодной области через контрагирующее отверстие, что приводит к росту потенциала на двойном электростатическом слое, существующего вблизи контрагирующего отверстия. На рис. 3 представлены зависимости напряжения U_d горения от тока I_d разряда (ВАХ разряда) при различных давлениях p рабочего газа (значения U_d и I_d усреднены по импульсу). ВАХ дугового разряда имеет растущий характер, при этом уменьшение давления p приводит к более сильному росту напряжения U_d при увеличении тока I_d. Ограничение тока I_d, наблюдаемое при уменьшении давления p, обусловлено переходом из контрагированного режима функционирования дуги в каскадный режим, т.е. появлением катодных пятен на поверхности контрагирующего электрода.

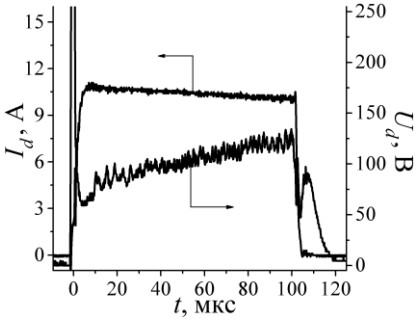


Рис. 2. Осциллограммы тока I_d и напряжения U_d горения дугового разряда

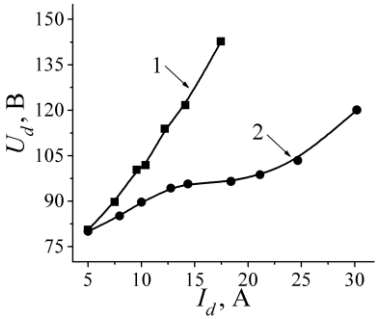


Рис. 3. ВАХ контрагированного дугового разряда: *1* – p = 8 Па; *2* – p = 15 Па

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00123.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щанин П.М. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером. – Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. – 150 с.

2. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.

3. Handbook of vacuum arc science & technology: fundamentals and applications / edited by R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin. – New Jersey: Noyes Publications, 1995. – 742 p.

4. Злобина А.Ф., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Исследование режимов горения дугового контрагированного разряда с полым анодом // Источники электронов с плазменным эмиттером. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 64–70.

5. Гаврилов Н.В., Крейндель Ю.Е., Окс Е.М., Щанин П.М. Условия существования и предельные параметры импульсной контрагированной дуги низкого давления // Журнал технической физики. – 1984. – Т. 54, № 1. – С. 66–72.

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ИХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ СПЕКАНИЕ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

Т.Ф. Марчук, студент; В.Т. Чан, аспирант каф. физики

Научный руководитель А.С. Климов, проф. каф. физики, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tranvantu0208@gmail.com

Представлены результаты электронно-лучевого спекания композита из оксида алюминия титана. Показано, что однородность спекания зависит от толщины спекаемого образца и с увеличением толщины

увеличивается количество дефектов. Основная причина такой зависимости – низкая теплопроводность металлокерамики.
Ключевые слова: плазма, плазменный электронный источник, электронно-лучевое спекание, металлокерамика**.**

В настоящее время электронно-лучевая технология востребована во многих отраслях промышленности, а ее совершенствование и развитие происходит значительными темпами. Создание того или иного вида материала требует привлечения соответствующей технологии. Так, в работах [1, 2] представлено электронно-лучевое спекание металлокерамического функционально-градиентного материала. Показана принципиальная возможность применения форвакуумного плазменного электронного источника для создания материалов с изменяющимся по объему составом. Использование для спекания электронного пучка обусловлено эффективной передачей мощности от пучка к облучаемой мишени и достаточно простым управлением параметрами пучка. В настоящей работе исследовали влияние толщины образцов на их электронно-лучевое спекание в форвакуумной области давлений.

Экспериментальная установка состоит из вакуумной камеры, оснащенной системой откачки и необходимым диагностическим оборудованием, а также форвакуумного плазменного электронного источника (рис. 1). Электронно-лучевое облучение осуществлялось в среде гелия при давлении 30 Па. Скорость нагрева составляла 30 град/мин. Выдержка при постоянной температуре занимала 10 мин, скорость остывания оставляла 50 град/мин. Время изотермической выдержки было выбрано, исходя из нашего опыта спекания оксида алюминия.

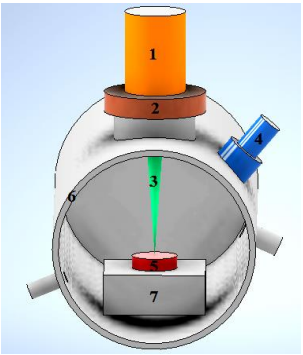


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – плазменный источник сфокусированного электронного пучка; *2* – магнитная фокусирующая и отклоняющая катушки; *3* – электронный пучок; *4* – инфракрасный пирометр; *5* – спекаемый образец; *6* – вакуумная камера; *7* – тигель

Для изготовления металлокерамики были выбраны порошки оксида алюминия со средним размером 10 мкм и титана с размером частиц менее 60 мкм. Выбор такой комбинации материалов обусловлен

их широким использованием в технологиях создания композитных материалов. Порошки оксида алюминия и титана смешивали в пропорции 50/50 (% мас.) в течение 30 мин, после чего прессовались в образцы с разными толщинами.

Как показали эксперименты, более тонкие образцы (2,3; 2,8 мм) имеют ровную поверхность после спекания (рис. 2, *а*), в то время как поверхность более толстых образцов (5,2 и 6,7 мм) оказалась более развитой с многочисленными кратерами и углублениями (рис. 2, *б*). Скорость нагрева обратной стороны образца, а также температура, до которой был осуществлен ее нагрев, существенно зависят от размеров образца. Так, для относительно тонких образцов (до 4 мм толщиной) на необлученной стороне наблюдается плавление металлической компоненты (титана) (рис. 2, *в*), что косвенно подтверждает нагрев до 1600 °С (температура плавления титана составляет 1668 °С). Для образца толщиной более 4 мм необлученная сторона достаточно легко истирается (рис. 2, *г*), что говорит о недостаточном прогреве и отсутствии спекания.

Дальнейшие исследования следует направить на поиск режимов нагрева, при которых будет снижен температурный перепад по объему облучаемого образца.

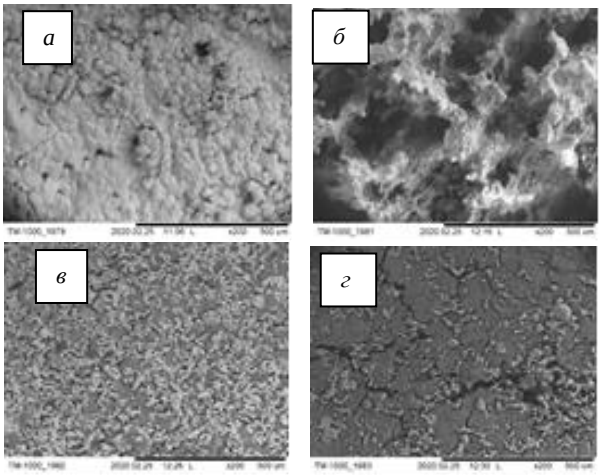


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей спекаемого образца

Заключение. Представлены результаты электронно-лучевого спекания композитной металлокерамики на основе оксида алюминия и титана. Показано, что однородность спекания зависит от толщины

образца. С увеличением толщины увеличивается количества дефектов. Основная причина такой зависимости – низкая теплопроводность металлокерамики. Требуется оптимизация процесса нагрева для снижения температурного градиента и повышения однородности спекания.

Работа поддержана Грантом Президента для докторов наук, соглашение № 075-15-2019-372.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климов А.С., Медовник А.В., Юшков Ю.Г. и др. Применение форвакуумных плазменных источников электронов для обработки диэлектриков. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2017.

2. Чан Ван Ту, Климов А.С. Электронно-лучевой метод формирования градиентных металлокерамических материалов в форвакуумной области давлений // Матер. докл. XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», 20–22 ноября 2019 г. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 181–183.

УДК 621.382.032.27

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ БАРЬЕРНЫХ КОНТАКТОВ К АРСЕНИДУ ГАЛЛИЯ

А.Н. Шалев, студент; О.Н. Минин, нач. лаб. формирования тонких пленок АО «НИИПП»

Научный руководитель Ю.С. Жидик, н.с. лаб. ЛИОР

г. Томск, ТУСУР, ashalev@mail.ru

Представлены результаты по определению энергии активации процессов, приводящих к деградации барьеров Шоттки Ti/Pt/Au – *n*-GaAs и Ti/Au – *n*-GaAs. Установлено, что энергия активации деградации составляет 0,71 эВ для барьера Шоттки Ti/Pt/Au – *n*-GaAs и 0,51 эВ для барьера Шоттки Ti/Au – *n*-GaAs.

Ключевые слова: барьер Шоттки, арсенид галлия, диффузионный барьер, энергия активации деградации.

Постановка задачи. Эффективным решением возможной диффузии атомов металлов в системах многослойной металлизации, которая возможна при нагреве и которая приводит к деградации барьеров Шоттки (БШ), является введение в структуру контакта дополнительного слоя металлизации – диффузионного барьера, препятствующего взаимной диффузии слоев [1].

Целью данной работы является определение энергии активации процессов, приводящих к деградации БШ к GaAs, на основе двух систем металлизаций Ti/Au и Ti/Pt/Au. В качестве контролируемого параметра-критерия годности была выбрана высота БШ.

Экспериментальная часть. Исследуемые структуры Ti/Au – *n*-GaAs и Ti/Pt/Au – *n*-GaAs были получены методом термического и электронно-лучевого испарения соответственно. БШ были выполнены в виде окружности диаметром 100 мкм. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) были измерены методом Кельвина при помощи анализатора полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Толщины пленок были измерены на оптическом профилометре Neox и составили 100/50/300 нм для Ti/Pt/Au и 200/300 нм для Ti/Au, полученного методом термического испарения.

Электрофизический параметр структуры высота БШ определялся методом ВАХ [2].

Энергия активации определялась из закона Аррениуса–Льюиса, на основе которого принято, что скорость изменения контролируемого параметра $V_п$ описывается соотношением

$$V_п = C \cdot \exp(-E_a/k_b T), \quad (1)$$

где C – размерный коэффициент, чаще всего константа; E_a – энергия активации процессов, приводящих к изменению контролируемого параметра; k_b – постоянная Больцмана; T – температура.

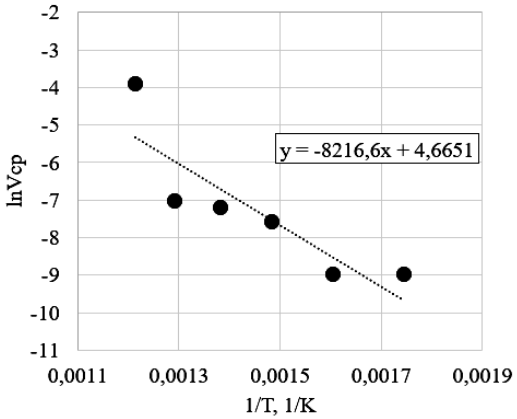
Образцы подвергались ступенчатому отжигу при температурах 300–550 °С, начиная с 10 мин для температур 300–350 °С и 5 мин для температур 400 °С и выше, с последующим увеличением времени отжига после каждой серии. Высота БШ контролировалась после каждой серии отжига. На основе этих данных были построены зависимости изменения высоты БШ от времени при разных температурах отжига, из которых была определена средняя скорость изменения высоты БШ $V_{ср}$.

Результаты работы. На рис. 1 представлена обратная температурная зависимость средней скорости изменения высоты БШ.

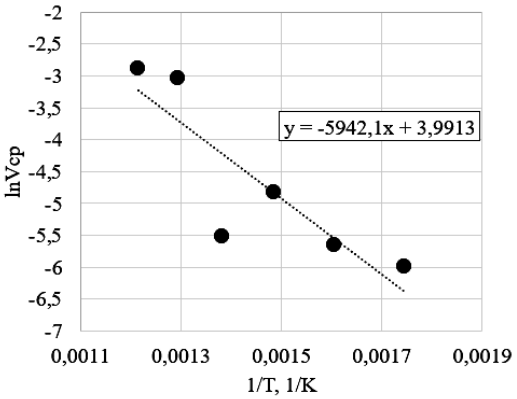
Из коэфициента наклона аппроксимирующей прямой по формуле (1) была определена энергия активации деградации БШ. Энергия активации деградации для БШ Ti/Pt/Au – *n*-GaAs составила 0,71 эВ, для БШ Ti/Au – *n*-GaAs – 0,51 эВ. В связи с чем можно установить, что БШ Ti/Pt/Au – *n*-GaAs является более температуростойким.

Работа выполнена в рамках научного проекта «Теоретические и экспериментальные исследования сверхширокополосных оптоэлектронных устройств волоконно-оптических систем передачи информации и радиофотоники на основе фотонных интегральных схем собственной разработки» выполняемого коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта FEWM-2020-0040). Экспериментальные результаты получены с ис-

пользованием оборудования ЦКП «Импульс» (регистрационный номер 200568).



а – БШ Ti/Pt/Au – *n*-GaAs



б – БШ Ti/Au – *n*-GaAs

Рис. 1. Обратная температурная зависимость скорости изменения высоты БШ

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов Д.Г., Мочалов А.Д., Сумилин А.Д., Шевяков В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем: учеб. пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 277 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

УДК 621.318.124

АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРИТОВЫХ СТРУКТУР

И.П. Шарков, студент каф. КУДР

Научный руководитель С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, sharkov.99@mail.ru

Анализируется тенденция развития методов производства ферритовых структур и производство СВЧ-электроники имеющих в своей основе ферриты. Рассматривается направление, основанное на производстве ферритов аддитивным методом. В частности, исследуется влияние состава и метода производства ферритовой структуры на конечные параметры СВЧ-элемента.

Ключевые слова: ферриты, гексагональные ферриты (гексаферриты), петля гистерезиса, коэрцитивная сила.

На сегодняшний день рынок производства ферритовых структур стремительно растет, однако многие производители используют устаревшие методы механической обработки при формировании формы ферритового изделия. В данной статье рассматриваются альтернативные способы производства ферритов методом аддитивных технологий. Ферриты применяются в качестве магнитных материалов в радиоэлектронике, радиотехнике и вычислительной технике, поскольку сочетают в себе высокую магнитную восприимчивость с полупроводниковыми или диэлектрическими свойствами. В сфере СВЧ-электроники ферриты хорошо зарекомендовали себя и уже давно используются в производстве ФАР, ферритовых изоляторов, волноводов и т.д.

В рамках статьи рассматриваются предлагаемые методы аддитивного производства ферритов, имеющих в своем составе гексаферриты бария и порошок феррита стронция.

В первом рассмотренном методе предлагается изготовить керамическую пасту на основе порошков заготовок $BaCO_3$ и Fe_2O_3 для получения в итоге гексаферита бария $BaFe_{12}O_{19}$. В данном методе для получения пасты необходимо разделить порошки заготовки на две группы. После чего тщательно перемалывают в течение 4 ч, первая группа перемалывалась в ступе, а вторая подверглась обработке на планетарной мельнице. Перемолотые заготовки смешивают с деионизированным водным раствором, содержащим связующий поливиниловый спирт, пластификатор ПЭГ-400 и диспергератор. После гомогенизации приготовленная паста помещается в шприц для 3D-печати. Печать происходит в заготовленную заранее форму, после чего высушивается при комнатной температуре до затвердевания и запекается в течение 5 ч в высокотемпературной печи с фиксированной скоростью нагрева от 1°С в минуту.

Итоговые характеристики готового гексаферрита бария получаются следующие: намагниченность насыщения M = 0,72 А/м, что очень близко к теоретически рассчитанной (0,74 А/м), это показывает, что полученные ферритовые компоненты имеют высокое магнитное поле, что говорит о качестве изготовленных гексаферритов. Показатель коэрцитивной силы H_c достиг максимума около 333,9 кА/м, что значительно превышает обычные керамические методы (159 кА/м), это свидетельствует о хороших магнитных свойствах [1].

Вторым методом предлагается изготовить гель-пасту феррита стронция $SrFe_{12}O_{19}$. В качестве сырья используется порошок стронция со средним размером частиц 1 мкм. Для приготовления гель-пасты необходимо обработать порошок-заготовку силаном, связующий агент KH560 для улучшения поверхностной активности порошков. Затем смешиваются в растворе деионизированной воды обработанный порошок с мономером гидроксиэтилкрахмал метилметакрилата, метиленбисакриламид в качестве сшивающего агента и полимер Silok7050S. Полученный раствор необходимо смешать в лабораторной центрифуге в течение 30 мин. Готовый раствор помещают в шприц для аддитивной печати. Печать производилась с помощью шнекового экструдера для регулировки времени гелеобразования. Отпечатанные изделия подвергались высушиванию в вакуумной печи при температуре 50 °C в течение 8 ч. Высушенные образцы обрабатываются при 500 °C в течение 1 ч и затем выпекаются при 1300 °C в течение 2 ч со скоростью нагрева 4 °C в минуту.

Итоговые характеристики феррита стронция получились следующие: показатель коэрцитивной силы H_c равен 271,2 кА/м, максимальная энергия продукта BH_{max} составила 26,34 кДж/м [2]. Сравнивая результаты этих двух методов, можно отметить, что наиболее качественными характеристиками обладает метод печати гексаферритов бария. Это вызвано как составом материалов, так и самим процессом производства ферритовой структуры.

Целью данного исследования является поиск решений в быстром, качественном и нересурсозатратном производстве ферритов из различных металлов с дальнейшим использованием их в изготовлении СВЧ-электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Net-shaped barium and strontium ferrites by 3D printing with enhanced magnetic performance from milled powders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885319313277

2. 3D gel-printing of Sr ferrite part [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218324519

УДК 539.231

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АДГЕЗИОННОГО ПОДСЛОЯ ИЗ ХРОМА, НАНЕСЕННОГО МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ И МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Н.А. Шелестов, студент каф. ФЭ

Научный руководитель Ю.В. Сахаров, доцент каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, hukumashelestov@gmail.com

Рассматривается электрические и механические свойства пленок хрома, нанесенных методами термического испарения в вакууме и магнетронного распыления в атмосфере аргона.

Ключевые слова: магнетронное распыление, термическое испарение в вакууме, адгезионный подслой.

Одной из проблем тонкопленочной технологии в микроэлектронике и микросистемной технике является адгезия пленок. Для достижения высокой адгезии применяют различные методы, например, между подложкой и пленкой наносят специальные слои, обладающие высоким потенциалом взаимодействия, как с подложкой, так и с пленкой. В качестве таких слоев в кремниевой технологии наиболее часто используют титан, хром и ванадий.

Целью данной работы являлось исследование свойств адгезионного подслоя из хрома с разными способами нанесения.

Методика эксперимента. В качестве подложки использовались предметные стекла.

При термическом испарении в вакууме использовался испаритель, представляющий собой молибденовую лодочку, в который загружалось испаряемое вещество: хром. Во время нанесения пленки хрома подложка подводилась к испарителю, где в течение 10 мин производилось нанесение материала. Нанесение происходит при давлении в вакуумной камере 10^{-5} мм рт. ст. и токе испарителя 26 А.

При магнетронном распылении использовалась мишень, состоящая из хрома. Распыление производилось в атмосфере аргона. Нанесение пленки хрома производилось в течение 1,5 мин при давлении в вакуумной камере $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и токе 300 мА [1].

Измерение электрических свойств пленок проводилось на установке четырехзондового метода определения удельного сопротивления. Измерения адгезионных характеристик пленок проводились методом прямого отрыва. Для определения толщины пленок использовался микроинтерферометр Линника МИИ-4М.

Анализ результатов. Исследование электрических характеристик пленок хрома, полученных разными методами, показало, что

пленки, полученные методом термического испарения в вакууме, имеют меньшее удельное объемное сопротивление по сравнению с пленками, полученными методом магнетронного распыления. В табл. 1 представлены результаты расчетов удельного поверхностного и удельного объемного сопротивлений пленок хрома для двух методов нанесения.

Таблица 1

Результаты расчетов удельного поверхностного и удельного объемного сопротивлений пленок хрома для двух методов нанесения

Номер области измерения	Термическое испарение в вакууме		Магнетронное распыление	
	ρ_s, Ом/■	ρ_v, Ом·м	ρ_s, Ом/■	ρ_v, Ом·м
1	3,44	$4{,}81\cdot10^{-7}$	122,42	$1{,}71\cdot10^{-5}$
2	2,91	$4{,}08\cdot10^{-7}$	47,53	$6{,}65\cdot10^{-6}$
3	5,18	$7{,}25\cdot10^{-7}$	27,53	$3{,}85\cdot10^{-6}$
4	4,16	$5{,}83\cdot10^{-7}$	23,22	$3{,}25\cdot10^{-6}$
5	4,11	$5{,}76\cdot10^{-7}$	51,46	$7{,}2\cdot10^{-6}$
6	4,21	$5{,}9\cdot10^{-7}$	103,55	$1{,}45\cdot10^{-5}$
7	3,23	$4{,}53\cdot10^{-7}$	159,31	$2{,}23\cdot10^{-5}$
8	2,63	$3{,}68\cdot10^{-7}$	77,69	$1{,}09\cdot10^{-5}$
9	2,62	$3{,}67\cdot10^{-7}$	44,05	$6{,}17\cdot10^{-6}$
10	3,23	$4{,}52\cdot10^{-7}$	35,62	$4{,}97\cdot10^{-6}$
11	3,02	$4{,}23\cdot10^{-7}$	65,41	$9{,}17\cdot10^{-6}$
12	3,23	$4{,}52\cdot10^{-7}$	106,84	$1{,}49\cdot10^{-5}$

Исследование адгезионных характеристик пленок хрома проводилось в разных областях образца. В табл. 2 и 3 представлены результаты измерения адгезионных характеристик для пленок хрома, полученных методами термического испарения в вакууме и магнетронного распыления.

Таблица 2

Результаты измерения адгезионных характеристик для пленки хрома, полученной методом термического испарения в вакууме

№	m, кг	$S\cdot10^{-6}$, м^2	W_a, кг/м^2
1	0,218	8	27250
2	0,221	5	44200
3	0,220	7	31428,57
4	0,225	9	25000

Таблица 3

Результаты измерения адгезионных характеристик для пленки хрома, полученной методом магнетронного распыления

№	m, кг	$S\cdot10^{-6}$, м^2	W_a, кг/м^2
1	0,580	8	72500
2	0,585	10	58500
3	0,590	9	65555,56
4	0,590	12	49166,67

Выяснилось, что работа адгезии для пленки, полученной методом магнетронного распыления в вакууме, выше, чем у пленки, полученной методом термического испарения в вакууме [2].

Обработка результатов. Увеличение удельного объемного сопротивления пленки, полученной методом магнетронного распыления связано с тем, при магнетронном распылении пленка загрязнена сторонними веществами, так как при данном методе используют инертный газ аргон, который имеет долю примеси в своем составе. Данная примесь взаимодействует с распыленными атомами хрома и осаждается на подложку.

Увеличение работы адгезии пленок хрома, полученных методом магнетронного распыления, связано с высокой энергией конденсирующихся частиц при распылении (несколько электрон-вольт), в то время как при испарении энергия осаждаемых частиц составляет доли электрон-вольта [3].

Выводы. Анализ полученных данных позволяет сделать выводы, что при разных методах нанесения пленок хрома имеются разные электрические и механические свойства пленок. При магнетронном распылении работа адгезии пленки выше, чем при термическом распылении испаряемого вещества в вакууме. Однако удельное сопротивление пленок при термическом распылении меньше, чем при магнетронном распылении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2006. – 165 с.

2. Смирнов С.В. Методы исследования материалов и структур электроники: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 143 с.

3. Зимон А.Д. Адгезия пыли и попрошков. – М.: Химия, 1976. – 430 с.

УДК 62-932.4

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

А.А. Шейнбергер, студент каф. ФЭ

Научный руководитель И.А. Чистоедова, к.т.н., каф. ФЭ

г. Томск, ТУСУР, anyasheinberger@yandex.ru

Проект ГПО ФЭ-1304 «Технология и формирование наноструктур»

Представлены результаты исследования качества ультразвуковой очистки ситалловых подложек от температуры раствора и времени очистки. Определена разрешающая способность фоторезистов

ФП-9120-2 и S1818 и даны рекомендации относительно выбора фоторезиста для реализации обратной контактной фотолитографии.
Ключевые слова: контактная фотолитография, обработка подложек, фоторезист, разрешающая способность.

Обработка подложек играет важную роль в контактной фотолитографии, так как органические загрязнения и адсорбированные частицы на поверхности подложки снижают её адгезионную способность. Кроме того, результат фотолитографии зависит от выбора фоторезиста. Целью проделанной работы было разработать режим обработки ситалловых подложек методом ультразвуковой очистки, а также исследовать разрешающую способность фоторезистов марок ФП-9120-2 и S1818.

Метод ультразвуковой очистки основан на кавитации – образовании в жидкости под действием УЗ-колебаний пузырьков, взрыв которых провоцирует мощные гидропотоки, вымывающие загрязнения. Для определения оптимального режима очистки было проведено два эксперимента. Подложка из ситалла СТ-50-1 размером 48×60 мм помещалась в УЗ-ванну марки GT SONIC VGT-1620QTD и проходила в ней обработку в растворе KOH(6%). В первом эксперименте температура раствора поддерживалась фиксированной и равной 40 °С, а время очистки изменялось от 1 до 5 мин. В ходе второго эксперимента фиксировалась длительность обработки, а температура изменялась от 40 до 80 ºС. После обработки в обоих экспериментах подложки промывались в деионизованной воде. Контроль качества очистки осуществлялся методом пульверизации, основанном на зависимости сплошности водной пленки, образуемой на подложке при пульверизации деионизованной воды, от качества очистки. Критерий качества очистки – суммарная площадь водных капель. Результаты эксперимента представлены на рис. 1 и 2.

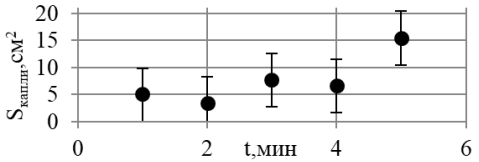


Рис. 1. Зависимость площади капель от времени очистки

Согласно результатам эксперимента, при температуре раствора 40 ºС и частоте колебаний УЗ-ванны 40 кГц качество очистки растет с увеличением времени очистки. Наилучший результат наблюдался при времени очистки 5 мин. С ростом температуры раствора в диапазоне (40÷80) ºС качество очистки также возрастает. Однако при температу-

ре раствора выше 50 °С температурная зависимость качества очистки ослабевает. Следовательно, температура раствора, равная 50 °С является достаточной, а дальнейшее увеличение температуры нецелесообразно.

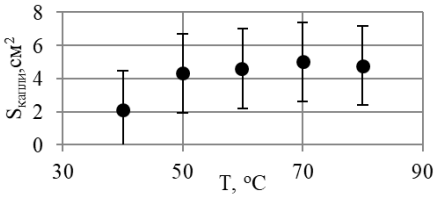
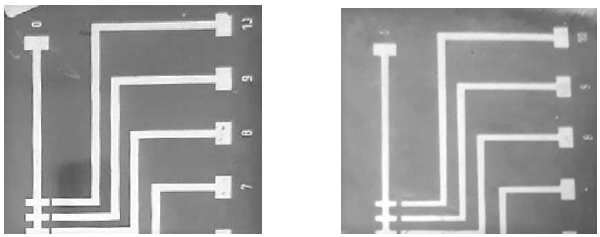


Рис. 2. Температурная зависимость площади капель

Для оценки разрешающей способности позитивных фоторезистов был реализован технологический процесс обратной контактной фотолитографии. На обработанные подложки методом центрифугирования (при частоте вращения центрифуги 300 об/мин) наносился фоторезист толщиной 2 мкм. Термообработку подложек проводили при температуре 90 °С в течение 15 мин. На установке совмещения и экспонирования СТ-301 фоторезист экспонировали через фотошаблон. Проявление фоторезиста проводилось в растворе КОН (1,2%). Методом термического испарения в вакууме на подложку с фоторезистивной маской был нанесен тонкий слой алюминия толщиной 100 нм. Удаление фоторезистивной маски проводилось в диметилформамиде.

Результаты обратной контактной фотолитографии с применением исследуемых фоторезистов представлены на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. Результат эксперимента: *а* – при использовании фоторезиста S1818; *б* – при использовании фоторезиста ФП-9120-2

Ошибка фотолитографии для фоторезиста марки ФП-9120-2 составила 7%, а для фоторезиста S1818 – 1%, что согласуется со значениями разрешающей способности, заявленными в технических паспортах данных фоторезистов [1, 2].

Таким образом, для реализации обратной контактной фотолитографии рекомендуется проводить обработку подложек в УЗ-ванне при частоте колебаний 40 кГц и температуре раствора 50 °С в течение 5 мин. Для образования защитной маски использовать фоторезист марки S1818, обеспечивающий разрешающую способность выше по сравнению с фоторезистом ФП-9120-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 2378-015-29135749-2015. Серия позитивных фоторезистов ФП-9120-1,0; ФП-9120-1,8; ФП-9120-2,0. Технические условия. – М.: Фраст-М, 2015. – 44 с.

2. ST 2378-015-29135749-2015. Серия позитивных фоторезистов MICROPOSIT S1813, S1818, S1828. Технические условия. – М.: Фраст-М, 2015. – 10 с.

УДК 521.315.82.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОННОГО СПЕКТРА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

А.А. Климов, студент каф. ЭП; А.Н. Лапин, с.н.с. лаб. РКМ, к.т.н.

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, ygt.art@gmail.com

Измерения фононного спектра LED-гетероструктуры показали наличие пиков при энергиях 0,18–0,20 и 0,20–0,22 эВ. Выяснено, что эти энергии совпадают с энергиями фононов, генерируемых при захвате электронов на второй уровень размерного квантования $In_{0.12}Ga_{0.88}N$ квантовой ямы.

Ключевые слова: гетероструктура, квантовая яма, захват электронов.

В настоящее время в научной литературе недостаточно внимания уделяется рассмотрению механизмов захвата и эмиссии носителей заряда квантовой ямой (КЯ) в гетероструктурах. В свою очередь, данные механизмы определяют ток инжекции в КЯ, который определяет эффективность работы светодиодной ГС. Существует несколько подходов к описанию захвата и эмиссии носителей заряда: классическая модель Дж. Томсона [1] каскадная модель Лэкса [2]; модель Абакумова–Переля [3, 4]; модель Шокли–Рида–Холла. Однако ни одна из них в требуемом объёме не учитывает принципиальных свойств взаимодействия КЯ и носителей заряда, связанных с участием в захвате – эмиссии свободных частиц электронов и фононов с образованием стоячей волны, описывающей энергетический спектр электрона в КЯ [5, 6].

Модель захвата носителей заряда КЯ, представленная на рис. 1, показывает, что для захвата электрона необходимо, чтобы после столкновения с фононом [7] его энергия была равна энергии уровня размерного квантования в КЯ. При этом её избыток должен реализоваться в виде оптического фонона (показаны на рис. 1 волнистыми линиями в КЯ).

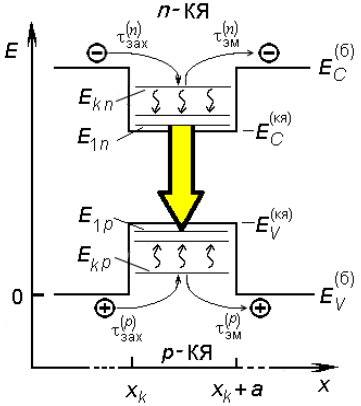


Рис. 1. Захват и эмиссия электронов и дырок квантовой ямой

Если описание состояния свободного электрона в барьерном слое и электрона-волны в яме не вызывает затруднений, то описание третьего участника взаимодействия – оптического или акустического фонона в КЯ – требует отдельного рассмотрения. Работ, в которых исследовались бы фононные спектры КЯ из InGaN и интерфейса «GaN-InGaN», в научной литературе недостаточно [1–7], в имеющихся отсутствуют данные о том, фононы с какими энергиями являются основными участниками столкновений с захватываемыми электронами.

Целью данной работы является экспериментальное исследование фононного спектра светодиодной гетероструктуры с КЯ по определению особенностей её фононного спектра в режиме излучения света, а также частот оптических фононов, которые могут быть ответственны за захват (эмиссию) электронов в КЯ.

Постановка эксперимента. Для определения фононного спектра в качестве исследуемых образцов использовались светоизлучающие гетероструктуры на основе барьера InGaN/GaN. Их фононный спектр измерялся методом Фурье-спектроскопии. Регистрировались спектры отражения в диапазоне от 0,04–0,5 эВ (400–4000 $см^{-1}$) на ИК-Фурье-спектрофотометре (ИКФС) «IRTracer-100». Всего исследовано несколько гетероструктур, показавших одинаковые результаты.

В начале эксперимента измерялся спектр выключенной ГС, который рассматривался как фоновый спектр. Затем снимался спектр включенной ГС, из которого вычитался фоновый спектр, и получаемый результирующий спектр рассматривался как итоговый. В другом эксперименте ГС покрывали слоем KBr и снимался спектр включенной ГС. В этом варианте измерений фоновым спектром выступал спектр KBr, измеренный отдельно на стеклянной подложке.

Результаты эксперимента. В программном обеспечении, работающем с ИКФС «IRTracer-100», полученные спектры отражения преобразовываются с помощью преобразования Кубелки–Мунка.

На спектре включенной ГС (рис. 2) обнаружено большое количество пиков длинноволнового излучения. Яркие пики в областях 0,08 и 0,28 эВ объясняются присутствием влаги, попавшей с ИКФС с воздухом. Пики в области 0,48–0,5 эВ, вероятно, вызваны аппаратными особенностями работы прибора. Только пики излучения с энергиями 0,353 и 0,356 эВ, а также серия пиков в областях 0,18–0,20 и 0,20–0,22 эВ могут свидетельствовать о поглощении и генерации фононов работающей ГС с КЯ.

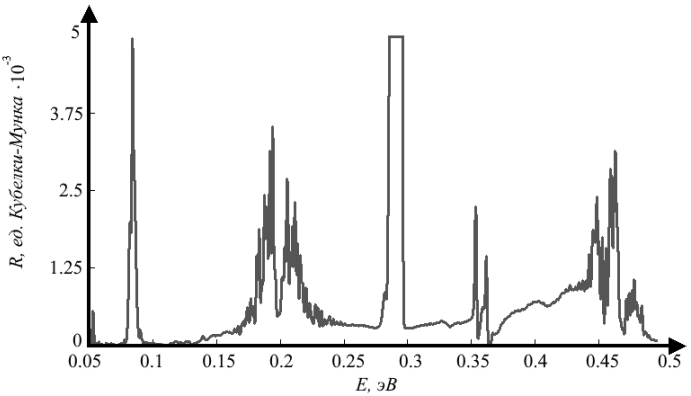


Рис. 2. Спектр InGaN/GaN, спектр выключенной гетероструктуры вычтен

Форма длинноволнового спектра излучающей в видимом диапазоне ГС, покрытой KBr, показана на рис. 3. Представленный спектр отличается от спектра, полученного без применения KBr. В частности, в нём отсутствуют пики с энергиями 0,353 и 0,356 эВ. Однако можно заметить, что в областях 0,18–0,20 и 0,20–0,22 эВ также присутствует серия пиков, аналогичных показанным на рис. 2. Указанные значения энергий с большой долей вероятности можно связать с энергиями фононов, образующихся в ГС при излучении видимого света. Это та энергия, которая забирается от электрона, опускающегося на уровень

размерного квантования. Если принять глубину КЯ равной 0,40 эВ, то энергия уровня размерного квантования (УРК), на который опускается электрон из барьерного слоя, составит 0,22 и 0,18 эВ. В квантовой яме из $In_{0.12}Ga_{0.88}N$ толщиной 2,0 нм имеется только два УРК с энергиями 0,048 и 0,94 эВ.

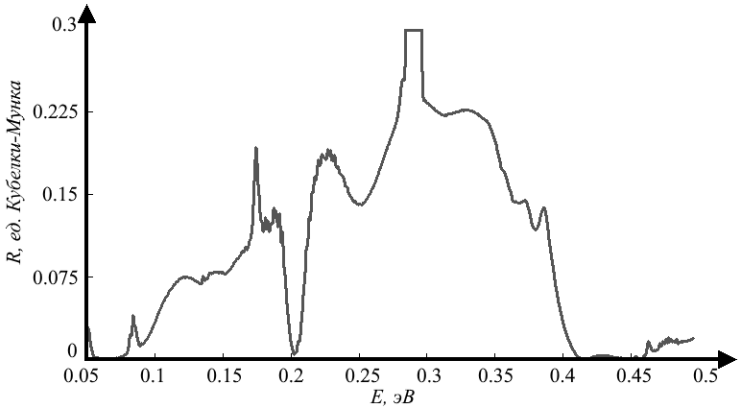


Рис. 3. Спектр InGaN/GaN с покрытием из KBr, вычтен спектр KBr

Следовательно, захват электронов может происходить только на второй УРК, являющийся к тому же ближайшим ко дну зоны проводимости барьерного слоя.

Выводы. В результате проделанной работы получены спектры светоизлучающей ГС с КЯ. На полученных спектрах наблюдаются пики при 0,353 и 0,356 эВ и серии пиков в областях 0,18–0,2 и 0,2–0,22 эВ, которые с разной степенью достоверности могут претендовать на реально генерируемые фононы гетероструктурой с квантовыми ямами в процессе излучения света видимого диапазона. Расчет показал, что для гетероструктур толщиной, типичной для изготавливаемых LED-источников, фононы с энергиями 0,18–0,20 и 0,20–0,22 эВ могут появиться при захвате электронов на второй уровень размерного квантования в квантовой яме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson J.J. The theory of recombination of gaseous ions // Philosophical Magazine. – 1924. – Vol. 47. – 337 p.

2. Lax M. Fluctuations from the Nonequilibrium Steady State // Reviews of Modern Physics. – 1960. – Vol. 32. – 25 p.

3. Yassievich I.N. Cross section for recombination of an electron with a positively charged center in a semiconductor / V.N. Abakumov, I.N. Yassievich // JETP. – 1976. – Vol. 71. – 657 p.

4. Абакумов В.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках / В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.В. Яссиевич. – СПб.: Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, РАН, 1997. – 376 с.

5. Соколова З.Н. Захват носителей заряда и выходная мощность лазера на квантовой яме / З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Л.В. Асрян // ФТП. – 2011. – №11(45). – С. 1553–1559.

6. Соколова З.Н. Скорость захвата электронов в зависимости от глубины квантовой ямы в полупроводниковых лазерах / З.Н. Соколова, К.В. Бахвалов, А.В. Лютецкий, И.С. Тарасов, Л.В. Асрян // ФТП. – 2016. – Т. 50, вып. 5. – С. 679–682.

7. Davydov V.N., Karankevich O.A. Capture and emission of charge carriers by quantum well // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 61, No. 2. – P. 223–231.

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

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОГО КЛАМПА ВО ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

А.И. Бартенев, магистрант;
Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru

Рассмотрены результаты практической реализации прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом во вторичной цепи.
Ключевые слова: прямоходовой преобразователь, активный кламп, синхронный выпрямитель, энергетические параметры.

Работа импульсных преобразователей электрической энергии сопровождается дополнительными динамическими потерями. Эти потери обусловлены коммутационными процессами в преобразователе и становятся доминирующими в образовании потерь в высокочастотных транзисторных преобразователях, особенно когда частота преобразования составляет сотни килогерц. Для снижения коммутационных потерь применяют демпфирующие цепи, наиболее эффективной из них является цепь активного клампа.

Схема прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной цепи (ПХПСВ–АКПЦ) имеет высокие энергетические характеристики за счёт применения синхронного выпрямителя и активного клампа. Синхронный выпрямитель уменьшает потери мощности в выпрямителе, а активный кламп в первичной цепи позволяет уменьшить напряжение на силовом транзисторе, что, в свою очередь, даёт возможность применить транзистор с меньшим напряжением сток-исток, соответственно обладающий меньшими паразитными параметрами [1].

Основным недостатком схемы ПХПСВ–АКПЦ являются высокочастотные колебания напряжения на транзисторах синхронного

выпрямителя, что требует применения транзисторов с более высоким максимально допустимым напряжением сток-исток, а это, в свою очередь, приводит к увеличению паразитных параметров транзисторов и снижению эффективности преобразователя [2].

В схеме прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной и вторичной цепи (ПХПСВ–АКПВЦ), представленной на рис. 1, подавление высокочастотных колебаний достигается введением конденсатора С2, коммутируемого транзистором VT5 (рис. 2) [3].

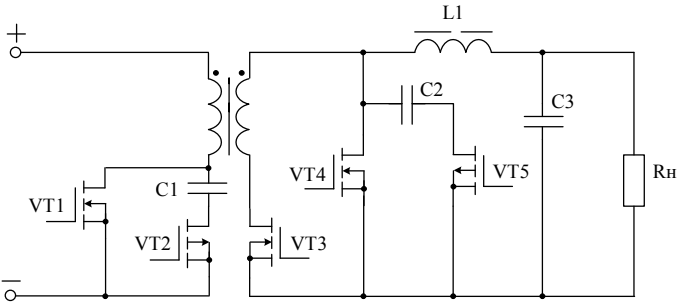
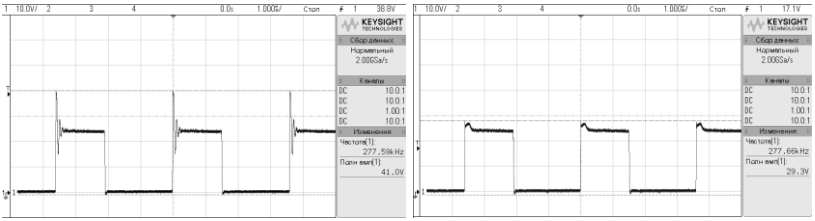


Рис. 1. Схема электрическая функциональная ПХПСВ–АКПВЦ



а *б*

Рис. 2. Осциллограммы напряжения на транзисторах синхронного выпрямителя: *а* – схема ПХПСВ–АКПЦ; *б* – схема ПХПСВ–АКПВЦ

В преобразователе, реализованном по схеме ПХПСВ–АКПВЦ, транзистор активного клампа включается с временной задержкой, что обеспечивает режим более мягкой коммутации транзисторов VT3, VT4 синхронного выпрямителя и способствует повышению энергетической эффективности преобразователя в целом.

В таблице представлены результаты исследования эффективности источников питания, реализованных на базе ПХПСВ–АКПЦ и ПХПСВ–АКПВЦ.

Исследования проводились для источников питания мощностью 30 Вт и напряжением на выходе $10 \pm 0{,}01$ В. Для измерения токов и напряжений использовались приборы цифровые АРРА 305, оснащенные RS-232 интерфейсом с оптической развязкой. Нагрузкой для источника питания служил переменный резистор С5-35В мощностью 100 Вт.

Энергетическая эффективность источников питания мощностью 30 Вт на базе ПХПСВ–АКПЦ и ПХПСВ–АКПВЦ

$U_{вх}$, В	ПХПСВ–АКПЦ			ПХПСВ–АКПВЦ		
	$I_{вх}$, А	$P_{вх}$, Вт	КПД	$I_{вх}$, А	$P_{вх}$, Вт	КПД
36	0,9268	33,36	0,907	0,9196	33,11	0,914
48	0,6920	33,22	0,911	0,6808	32,68	0,926
72	0,4738	34,11	0,887	0,4615	33,23	0,911

Таким образом, применение активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем позволяет уменьшить амплитуду высокочастотных колебаний напряжения на транзисторах синхронного выпрямителя, повысить эффективность преобразования до уровня 0,926 вместо 0,911, что для маломощных источников питания является существенным достижением. Результаты исследования планируется использовать при разработке и изготовлении источников питания приемно-передающих устройств, выпускаемых АО «НПФ «Микран».

ЛИТЕРАТУРА

1. Угринов П. Ограничение напряжения на силовом транзисторе в однотактных преобразователях напряжения // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 62–65.

2. LM5025 Reference Design–Active clamp forward converter with an input of 30–60 V to 15V@1.5A isolated // Power Applications Design Center, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ug/snvu096/snvu096.pdf (дата обращения: 14.01.2020).

3. Subodh Madiwale Digital Control Enables High Reliability DC-to-DC Power Conversion with Active Snubbing // Analog Devices, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.analog.com/en/technical-articles/digital-control-enables-high-reliability-dc-to-dc-power-conversion-with-active-snubbing.html (дата обращения: 14.01.2020).

УДК 621.311.69

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЭМИССИИ ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ И АКТИВНЫМ КЛАМПОМ ВО ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ

А.И. Бартенев, магистрант;
Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru

Рассмотрены результаты влияния активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной цепи на помехоэмиссию устройства.

Ключевые слова: прямоходовой преобразователь, активный кламп, синхронный выпрямитель, помехоэмиссия.

Современный этап развития электронной техники характеризуется разработкой и внедрением высокоэффективных импульсных преобразователей электрической энергии, работа которых сопровождается генерацией высокочастотных электромагнитных помех, обусловленных быстроизменяющимися напряжениями и токами. Основной проблемой, возникающей при разработке импульсных источников питания, является обеспечение электромагнитной совместимости, в частности, в составе радиоприемных устройств, согласно требованию ГОСТ30429–96 в части 1.1.1 [1].

Источник питания на базе прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной цепи (ПХПСВ–АКПЦ) характеризует высокая энергетическая эффективность [2]. Существенный недостаток ПХПСВ–АКПЦ заключается в том, что рабочий режим ПХПСВ–АКПЦ сопровождается генерацией высокочастотных помех, обусловленных колебаниями напряжения на транзисторах синхронного выпрямителя, что ухудшает электромагнитную совместимость с питающей сетью. В условиях предъявления жестких требований ГОСТ30429–96 это вызывает необходимость применения помехоподавляющих фильтров повышенной сложности.

Применение активного клампа во вторичной цепи в виде конденсатора с последовательно включенным транзистором позволяет подавить высокочастотные колебания напряжения на транзисторах синхронного выпрямителя и снизить влияние электромагнитного поля [3].

Исследования помехоэмиссии источника питания на базе ПХПСВ–АКПЦ и источника на базе прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной и вторичной цепи (ПХПСВ–АКПВЦ), представленного на рис. 1, проводились с использованием фильтра радиопомех (рис. 2) по методике, представленной в ГОСТ.30429–96.

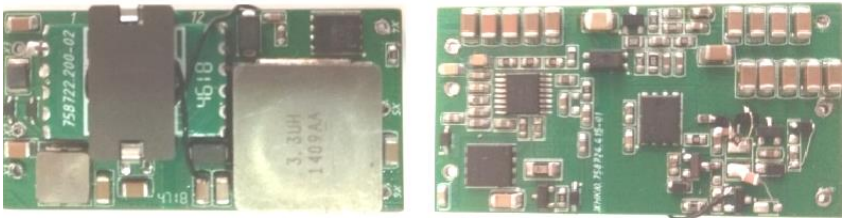
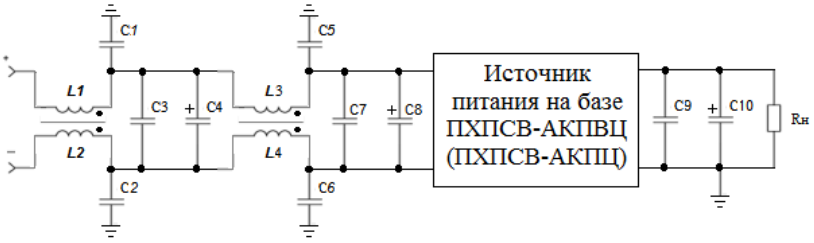


Рис. 1. Внешний вид источника питания на базе ПХПСВ–АКПВЦ



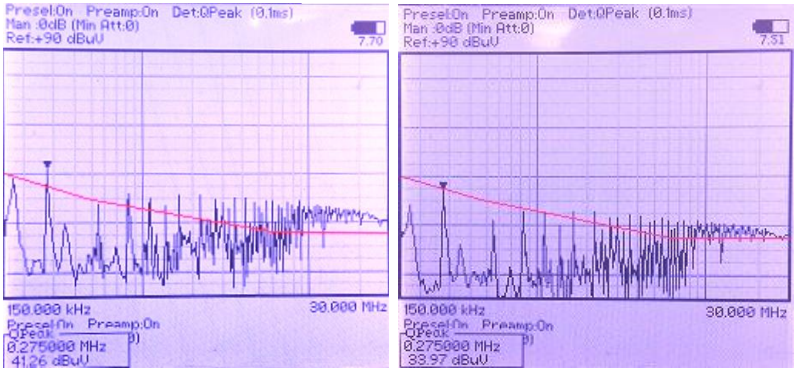
C1, C2, C5, C6 – 0,022 мкФ; C4, C8 – 68 мкФ; C10 – 330 мкФ;
C3, C7 – 2,2 мкФ; C9 – 22 мкФ; L1, L2, L3, L4 – 0,6 мГн.

Рис. 2. Схема электрическая функциональная для исследования помехоэмиссии источников питания

При испытаниях использован лабораторный источник питания, эквивалент сети Я6-127, обеспечивающий переходное затухание не менее 20 дБ. Измерения производились цифровым приемником радиопомех Narda PMM 9010, соответствующим стандарту в диапазоне частот от 10 Гц до 30 МГц, с расширением до 3 ГГц при использовании блока расширения PPM 9030. Результаты измерений напряжения радиопомех на входе фильтра источника питания представлены на рис. 3 в виде спектрограмм.

Анализ спектрограмм напряжения радиопомех, создаваемых источником питания на базе ПХПСВ–АКПВЦ, показывает уменьшение уровня помехоэмиссии на 4–8 дБ, по сравнению с источником питания на базе ПХПСВ–АКПЦ, причем во всём диапазоне частот.

Таким образом, применение активного клампа во вторичной цепи прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем и активным клампом в первичной цепи является эффективной мерой, направленной на уменьшение уровня помехоэмиссии. Результаты исследования планируется использовать при разработке и изготовлении источников питания приемно-передающих устройств, выпускаемых АО «НПФ «Микран».



а *б*

Рис. 3. Спектрограмма напряжения радиопомех на входе фильтра источника питания: *а* – на базе ПХПСВ–АКПЦ; *б* – на базе ПХПСВ–АКПЦ

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ30429–96. Совместимость технических средств электромагнитная. – Введ.1998-01-01. – М.: Госстандарт России, 1998. – 31 с.

2. LM5025 Reference Design – Active clamp forward converter with an input of 30-60V to 15V@1.5A isolated // Power Applications Design Center, 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ug/snvu096/snvu096.pdf (дата обращения: 14.01.2020).

3. Subodh Madiwale Digital Control Enables High Reliability DC-to-DC Power Conversion with Active Snubbing // Analog Devices, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.analog.com/en/technical-articles/digital-control-enables-high-reliability-dc-to-dc-power-conversion-with-active-snubbing.html (дата обращения: 14.01.2020).

УДК 621.311.69

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМ МОДУЛЕМ

К.Ж. Калжанов, магистрант; Д.Б. Бородин, электроник каф. ПрЭ

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, svd@ie.tusur.ru

Рассматриваются преобразователи с непрерывным током, которые имеют низкие пульсации напряжения на выходе, высокий КПД и улучшенные показатели электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: трансформатор, неизолированный импульсный преобразователь.

В настоящее время исследование источников питания с транзисторно-трансформаторным выпрямительным модулем (ТТВМ) актуально из-за возможности использования трансформатора для изменения выходного тока и напряжения с помощью коэффициента трансформации. В [1, 2] представлено семейство источников питания с ТТВМ, позволяющих получить необходимые значения токов и напряжений, представленных в таблице.

Входные и выходные параметры преобразователя

Параметр	Значение
Напряжение входного питания, В	$55 \div 95$
Ток потребления не более, А	25
Напряжение выходного питания, В	$100 \pm 1\%$
Ток нагрузки не более, А	15

Для уточненного исследования энергетических характеристик, с целью их дальнейшего сравнения, были выбраны схемы, представленные на рис. 1.

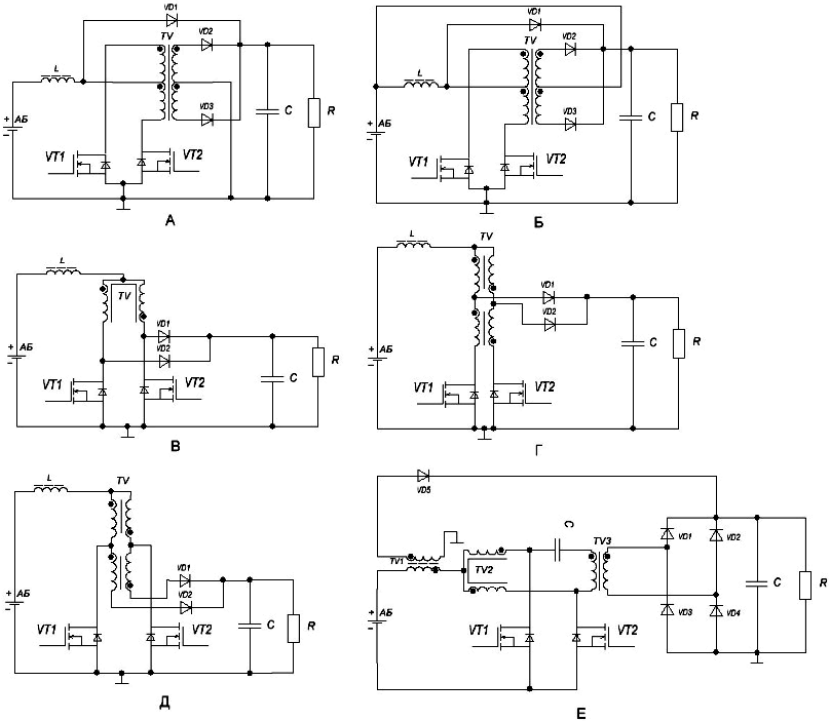


Рис. 1. Схемы, выбранные для исследования энергетических характеристик

Под энергетическими характеристиками будем понимать величину статических и динамических потерь, а также КПД преобразователя.

Измеренные энергетические характеристики получены при имитационном моделировании в среде LTspice. Зависимость динамических и статических потерь транзисторных ключей от относительной длительности периода представлена на рис. 2 и 3 соответственно. Зависимость КПД от выходной мощности представлена на рис. 4.

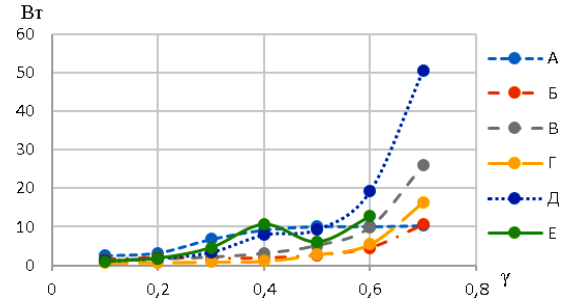


Рис. 2. Зависимость динамических потерь транзисторных ключей от относительной длительности периода

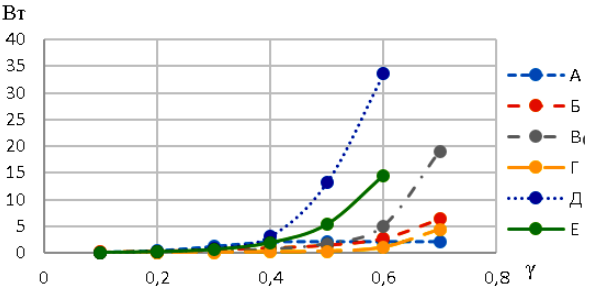


Рис. 3. Зависимость статических потерь транзисторных ключей от относительной длительности периода

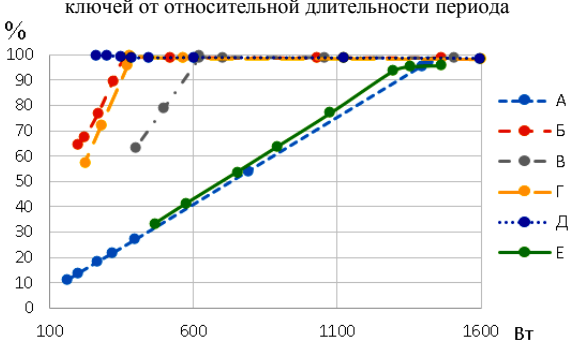


Рис. 4. Зависимость КПД от выходной мощности

Заключение. Исследование схем, выбранных для построения источников питания с ТТВМ, показало что высоким значением КПД в зависимости от выходной мощности, малыми динамическими и статическими потерями транзисторных ключах от относительной длительности периода, характеризуется схема, приведенная на рис. 1, Г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yan Li, Trillion Q. Zheng, and Qian Chen. Research on High Efficiency Non-Isolated Push-Pull Converters with Continuous Current in Solar-Battery Systems, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dx.doi.org/10.6113/JPE. 2014.14.3.432, свободный (дата обращения: 20.12.2014).

2. René P., Grover V., Francisco A.A., Carlos G.C., Cícero M.T., Luiz H.C. A New Isolated DC-DC Boost Converter using Three-State Switching Cell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/4334887_A_new_isolated_DC-DC_boost_converter_using_three-state_switching_cell, свободный (дата обращения: 19.06.2010).

УДК 621.38

ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИ РАБОТЕ НА ПРОТИВОЭДС

И.А. Чернецкий, студент; П.А. Стрельников, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, darkblackstudent@gmail.com

Рассмотрена работа двухтрансформаторного преобразователя на источник противоЭДС.

Ключевые слова: двухтрансформаторный преобразователь, мостовой преобразователь, DC-DC-преобразователь.

Двухтрансформаторный мостовой DC-DC-преобразователь (ДТМП) состоит из инвертора, состоящего из транзисторов (VT1–VT4), двух одинаковых высокочастотных трансформаторов (TV1–TV2), первичные обмотки которых включены последовательно, а вторичные параллельно через выпрямитель (VD1–VD2) [1]. Здесь и далее мы будем рассматривать работу двухтрансформаторного преобразователя на противо-ЭДС (*E*, рис. 1).

При анализе работы преобразователя были сделаны следующие допущения: трансформаторы изготовлены абсолютно идентично и имеют равные по величине индуктивности намагничивания Lm1 = = Lm2, их обмотки не имеют индуктивностей рассеяния. Вертикальные стойки транзисторов переключаются в противотакте по парам: VT1–VT2, VT3–VT4, с некоторым фазовым сдвигом, обеспечивающим интервал паузы, за счет которого производится регулирование.

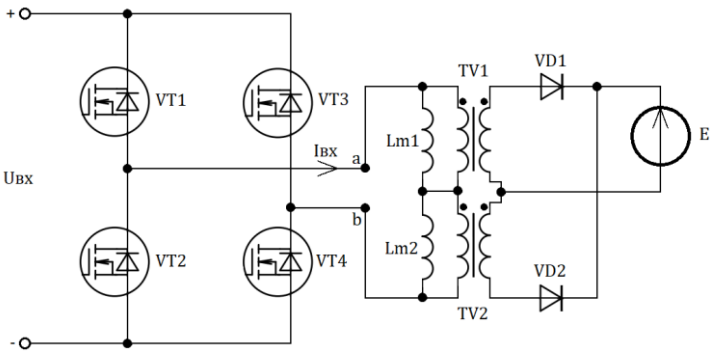


Рис. 1. Двухтрансформаторный преобразователь, нагруженный на противоЭДС

Анализ работы схемы ДТМП был произведен при помощи среды моделирования Simulink, которая является приложением к пакету MATLAB.

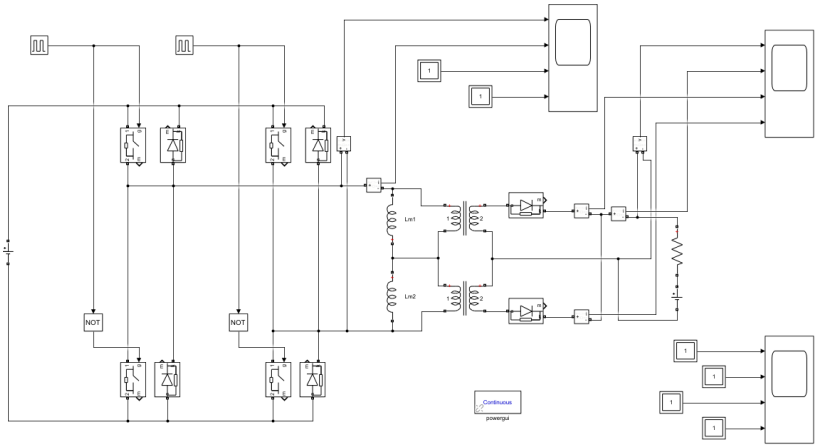


Рис. 2. Модель ДТМП в среде моделирования Simulink

Транзисторы в модели (рис. 2) заменены на идеальные ключи с параллельными обратными диодами, управление которыми происходит при помощи двух генераторов прямоугольных импульсов. Вход преобразователя представляет собой идеальный источник постоянного напряжения, в качестве нагрузки используется источник постоянного напряжения с некоторым небольшим внутренним сопротивлением. Для наглядности протекающих процессов в модели используются

идеальные трансформаторы с отдельно выведенными индуктивностями намагничивания.

На рис. 3 представлены временные диаграммы процессов, происходящих на первичной стороне. В момент времени T1 открываются ключи VT1–VT4, к трансформаторам прикладывается напряжение питания, которое делится пополам на две индуктивности намагничивания. При условии, что напряжение, прикладываемое к Lm1, будет больше приведенного к первичной стороне напряжения противоЭДС нагрузки, произойдет открытие диода VD1 и через первичную обмотку TV1 начнет протекать ток, передавая энергию в нагрузку. Как только диод VD1 откроется, к Lm1 приложится приведенное к первичной стороне E, которым Lm1 будет размагничиваться. На этом интервале мы наблюдаем снижение тока Lm1.

В свою очередь, напряжение, прикладываемое после открытия VD1 к Lm2, будет равно разности $U_{вх}$ и приведенного к первичной стороне E. Этим напряжением будет происходить намагничивание Lm2, при этом ток через первичную обмотку TV2 не протекает, и TV2 на этом интервале является дросселем. Такая особенность преобразователя предоставляет возможность отказаться от внешних сглаживающих дросселей при проектировании преобразователя.

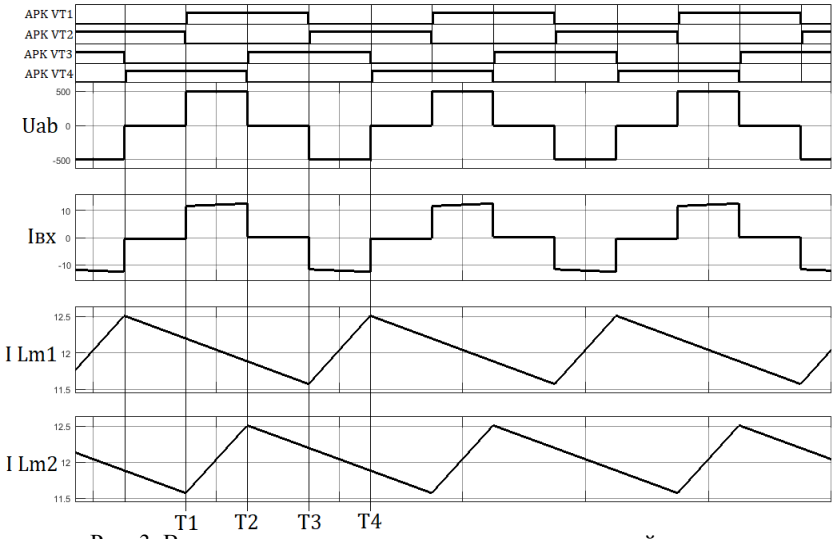


Рис. 3. Временные диаграммы процессов на первичной стороне

В момент времени T2 замыкается VT2, размыкается VT3, первичные обмотки трансформаторов замыкаются, на интервале времени

Т2–Т3 оба диода во вторичной отпираются и проводят ток в нагрузку, величина этих токов одинакова и равна половине тока, протекающего в нагрузке (рис. 4), при этом ток индуктивностей намагничивания обоих трансформаторов снижается.

В момент времени *Т3* замыкается вторая пара ключей VT2–VT3, к трансформаторам прикладывается обратное напряжение питания, и процессы протекают с точностью наоборот: начинает возрастать ток индуктивности намагничивания TV1, а ток намагничивания TV2 снижается, открывается диод VD2, и TV2 передает энергию в нагрузку, а TV1 выполняет роль дросселя. В момент времени Т4 замыкается VT4, размыкается VT3, первичные обмотки трансформаторов замыкаются, и все процессы повторяются.

Нарастание входного тока в диагонали моста на интервалах Т1–Т2 и Т3–Т4 вызвано постоянной составляющей токов, протекающих в индуктивностях намагничивая трансформаторов.

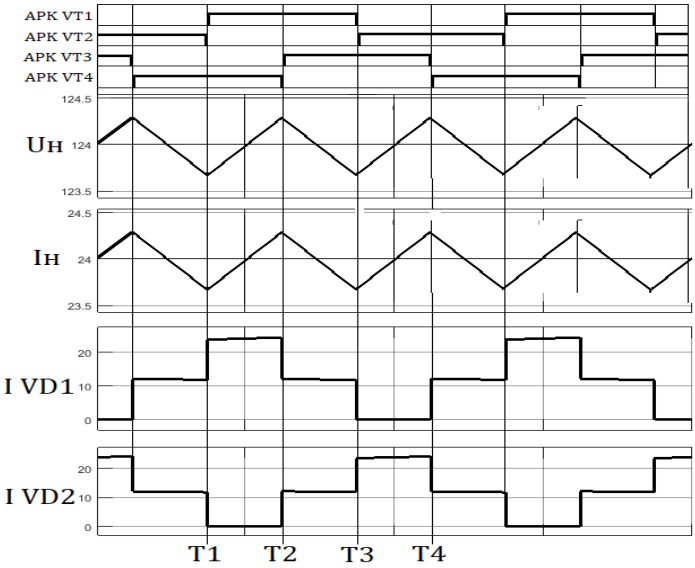


Рис. 4. Временные диаграммы процессов на вторичной стороне

При работе преобразователя на противоЭДС величина этой ЭДС, должна быть согласована с коэффициентом трансформации, а система управления должна обеспечить обратную связь по току. В этом случае преобразователь функционально будет выполнять роль источника тока, что обеспечит корректность работы схемы.

Заключение. Двухтрансформаторный преобразователь является хорошим решением для силовых преобразователей, работающих на противоЭДС, за счет уменьшения количества реактивных компонентов в звене выпрямителя путем полезного использования свойств структуры преобразователя, тем более, что она позволяет обеспечить режим мягкой коммутации силовых ключей [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

УДК 621.38

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Д.Н. Данилов, В.А. Лозовик, студенты;
П.А. Стрельников, аспирант каф. ПрЭ
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, dangig@list.ru

Рассмотрена система управления (СУ) параллельным резонансным инвертором с обратной связью по напряжению. Достоинство предложенной системы управления заключается в надежном подхвате свободных колебаний параллельного резонансного контура и высоком быстродействии системы управления.

Ключевые слова: резонансный контур, мостовой тиристорный инвертор, фазовый запас.

На рис. 1 представлена структурная схема преобразователя для индукционного воздействия на обрабатываемые детали (заготовки). Резонансный инвертор, обозначенный на схеме блоком «Инвертор», подключен к блоку «Сеть» через блок «Выпрямитель». Конденсатор параллельного резонансного контура находится внутри блока «Инвертор», а дроссель резонансного контура и активная нагрузка, представленные на схеме блоком «Индуктор-деталь», подключены к выходу инвертора. Источник питания собственных нужд (ИПСН) обеспечивает необходимыми напряжениями систему управления, на вход которой от инвертора поступает сигнал о резонансной частоте колебательного контура и величине напряжения на колебательном контуре. А выходные сигналы системы управления воздействуют на инвертор и выпрямитель, обеспечивая подстройку частоты переключения тиристоров к частоте колебаний резонансного контура с необходимым фазовым запасом и стабилизацию напряжения.

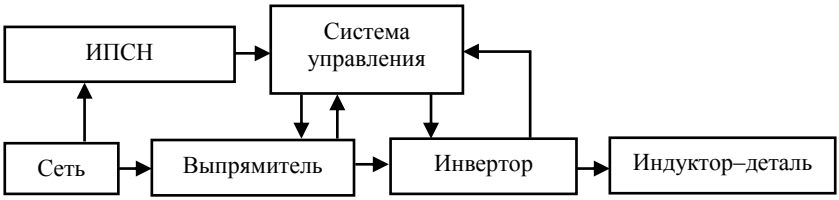


Рис. 1. Структурная схема преобразователя для индукционного нагрева

Динамичное изменение резонансной частоты параллельного колебательного контура происходит вследствие быстрого перемещения обрабатываемых деталей (заготовок) через индуктор, а также при образовании из нескольких деталей замкнутых контуров тока внутри индуктора, что может приводить к скачкообразному изменению эффективной индуктивности индуктора. Моменты времени образования замкнутых контуров, определяемые случайным положением заготовок, нестабильны во времени, т.к. связаны с довольно хаотичным движением заготовок внутри индуктора, образованием контуров тока при касаниях деталей друг друга, их обрывов при «огораниях» в местах этих контактов и сопровождающимся искрением. Эти моменты являются моментами импульсного воздействия на систему управления инвертором, цель которой – синхронизировать частоту переключения тиристоров с изменяемой частотой колебательного контура.

В настоящее время часто для управления инвертором применяется фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ). При быстром изменении резонансной частоты колебательного контура, вызванной, как сказано выше, быстрым изменением эффективной индуктивности контура, данный метод имеет ряд ограничений, так как ФАПЧ медленно отрабатывает ошибку по фазе и тем самым требует значительного фазового запаса, чтобы обеспечить коммутацию тиристоров до перехода через нуль напряжения колебательного контура. Это, в свою очередь, приводит к увеличению энергии, рекуперируемой из колебательного контура, в фильтр входного источника, а значит, и к снижению энергетической эффективности преобразования. Далее рассмотрена СУ, которая позволяет решить проблему стабилизации фазового запаса в случае динамично (быстро) изменяющейся частоты резонансного контура.

Для исследования преобразователя была построена имитационная модель тиристорного инвертора, изображённая на рис. 2. Она позволяет производить преобразование при динамично изменяющейся резонансной частоте резонансного контура, что решает проблему срыва преобразования при некорректных сигналах управления тири-

сторами либо завышенного значения фазового запаса, необходимого для реагирования системы с низким быстродействием на динамичные изменения резонансной частоты. Это достигается за счет высокого быстродействия данной системы управления в сравнении с классическими ФАПЧ-системами.

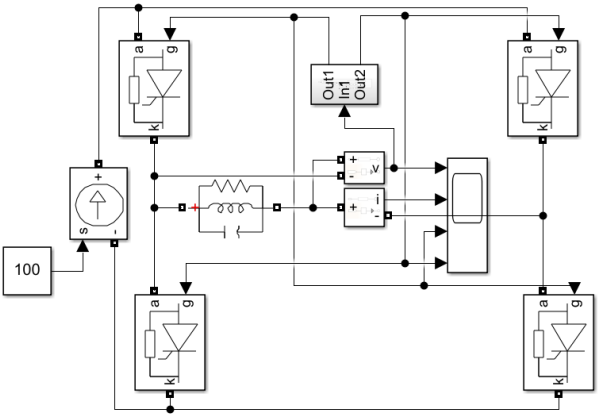


Рис. 2. Имитационная модель тиристорного инвертора

Несмотря на то, что тиристоры считаются сравнительно устаревшими полупроводниковыми приборами, в индукционном нагреве они до сих пор широко используются, в частности, благодаря наличию обратной блокирующей способности, необходимой для работы в параллельном резонансном инверторе. Падения напряжения на открытых тиристорах и IGBT-вентилях при идентичных максимальных токах и напряжениях ключей практически равны, однако IGBT-ключи требуют дополнительного диода для формирования указанной блокирующей способности, что ограничивает их применение в этой области. В этой связи в подобных задачах в области низких частот (до 10 кГц) тиристоры еще долгое время будут актуальны.

Источник постоянного тока в имитационной модели замещает сетевой выпрямитель с реактором, которые будут использованы в реальном преобразователе. Тиристорный мост с нужной частотой управления изменяет направление протекания постоянного входного тока через параллельный колебательный контур, где L и R – это элементы параллельной схемы замещения системы индуктор–деталь, а C – это конденсатор, компенсирующий реактивную мощность индуктора.

Для управления тиристорами разработана СУ, показанная рис. 3. Положительная и отрицательная полуволна синусоидального сигнала напряжения параллельного резонансного контура преобразуется ком-

паратором в сигнал с логической единицей и логическим нулем соответственно. Блок monostable сбрасывает значения счётчика counter, и тем самым формируется пилообразный сигнал на выходе счетчика, амплитуда которого пропорциональна длительности периода. Блок sample and hold фиксирует значение периода.

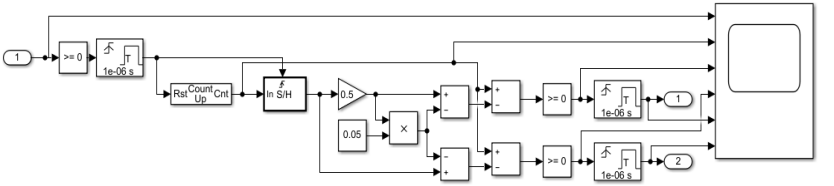


Рис. 3. Имитационная модель СУ, тиристорным инверторным мостом

Формирование уровней переключения в первом и втором полупериоде производится посредством вычитания из длительности периода и полупериода длительности времени абсолютной величины фазового запаса и сравнения этих величин с численным значением (пилой) счетчика. Эти операции необходимы для того, чтобы передний фронт сформированных импульсов опережал момент перехода напряжения компенсирующего конденсатора через ноль, что обеспечит открывание тиристоров в нужный момент времени.

На рис. 4 представлены временные диаграммы импульсов системы управления, формируемые в зависимости от подаваемого синусоидального напряжения на вход СУ. Напряжение step характеризует скачкообразное изменение частоты, счетчик counter формирует пилообразный сигнал, амплитуда которого пропорциональна периоду подаваемого синусоидального напряжения.

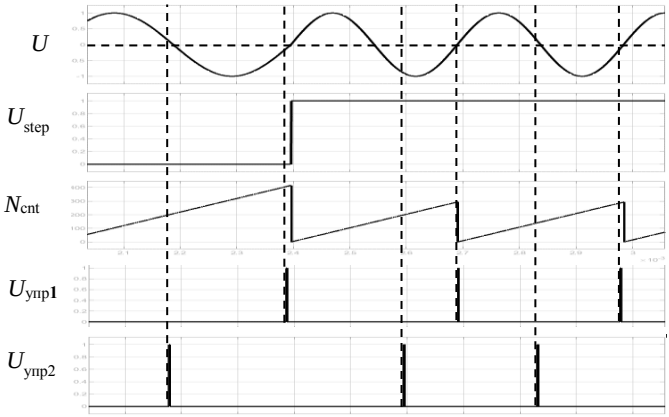


Рис. 4. Зависимость напряжения и тока от управляющего сигнала

Результаты имитационного моделирования скачкообразного изменения частоты показывают, что система управления стабилизирует заданный фазовый запас с опозданием (задержкой) в один период, после момента времени скачкообразного изменения частоты. В следующем, после скачка частоты, периоде колебаний, открываются диагонально по парам (до перехода подаваемого напряжения через ноль) тиристоры VS1, VS4 и VS2, VS3, предотвращая тем самым срыв инвертирования.

Заключение. В результате испытаний имитационной модели мостового тиристорного инвертора было выявлено, что предлагаемый способ управления, во-первых, характеризуется высоким быстродействием отработки динамичного изменения нагрузки, а во-вторых сравнительно прост при реализации в цифровых системах микроконтроллерного управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников А.М., Степук Я.В. Колебательные системы (Основы радиотехники и радиолокации): учеб. пособие. –4-е изд., перераб. – М.: Ордена Трудового Красного Знамени военное изд-во Министерства обороны СССР, 1972. – 376 с.

2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

УДК 543.544

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОКЛИМАТА В СЕРВЕРНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Д.Э. Шенцов, М.Д. Роговцев, М.Е. Емельянов, В.И. Тяпкин, В.А. Копылов, студенты каф. ЭАФУ ФТИ

г. Томск, НИ ТПУ

Рассмотрены различные системы контроля микроклимата в серверных помещениях. Сопоставлены и впоследствии выявлены преимущества ультразвукового парогенератора. Были рассмотрены требования к помещениям, содержащим IT-оборудование. Проанализированы стандарты СН 512-78 и TIA/EIA-942. Обоснована необходимость поддержания должного микроклимата в серверных помещениях. Оценена актуальность разработки данного устройства.

Ключевые слова: парогенератор, помещения, IT, микроклимат, влажность, статическое электричество.

Целью работы является изготовление парогенератора, регулирующего микроклимат в серверных помещениях, а также помещениях, содержащих IT-оборудование.

В настоящее время нельзя переоценить важность установки системы увлажнения в серверных помещениях. Поддержание температурного режима и соблюдение правил пожарной безопасности не гарантируют избавление от накапливающегося статического электричества. Влажность воздуха в таких помещениях играет одну из важнейших ролей, поскольку и сложная электроника, и коммутационные кабели могут выйти из строя в отсутствие надлежащих условий эксплуатации. Также и наоборот избыточная влажность вызывает образование конденсата, что влечет за собой коррозию.

Требования, предъявляемые к помещениям с IT-оборудованием, описаны в стандартах CH 512-78 и TIA/EIA-942. Рекомендуемая влажность для таких помещений колеблется от 30 до 50%. Измерения производятся на высоте 150 см от уровня пола. Температура должна быть от +18 до +24 °C, а запыленность – не выше 0,001 г/м^3. Все рекомендуемые и обязательные требования должны беспрекословно выполняться. Описанные негативные факторы, связанные с повышенной или пониженной влажностью, могут стать основной причиной пожара в серверном помещении.

Решения задачи поддержания оптимальной влажности можно достичь путем установки специальных систем охлаждения, изоляции серверного помещения от проникновения атмосферного воздуха и установки системы увлажнения.

Оптимальным решением для увлажнения серверных помещений будет установка форсуночных увлажнителей высокого давления. Эта система равномерно увлажняет, удаляет пыль, стабильно работает, не вызывает сложностей в процессе эксплуатации. Но при высоком давлении требуется регулярная проверка наличия масла, так как функционирование насоса без масла (и даже при его минимальном количестве) недопустимо.

Популярным вариантом является ультразвуковой увлажнитель. Эта система более простая в обслуживании, не требуется чистка форсунок и замена масла. Может быть установлена в любом подходящем месте, работает стабильно от сети 220 В.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод о том, что для поддержания микроклимата в серверных помещениях будет универсальным решением ультразвуковой увлажнитель.

Создание рабочего устройства проводилось в несколько этапов: подготовка корпуса для интеграции кулера и ультразвукового рассеивателя, написание программного кода устройства на базе Arduino Nano, монтаж схемы, сборка рабочего устройства.

Увлажнитель работает с помощью блока питания, используя адаптер mini USB. В процессе работы устройства датчик, расположенный на корпусе, каждые 5 с измеряет влажность в помещении. В связи с тем, что используемый датчик не обладает достаточной точностью, необходима нормировка. В течение работы увлажнителя данные о влажности, переданные датчиком, сравниваются со средним показателем нормы в диапазоне от 30 до 50%. Этой нормировкой достигаются приемлемые значения влажности. Также на корпусе расположен светодиод, свечение которого соответствует работе увлажнителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. TIA-942 Обзор стандартов для центров обработки данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://lindex.ru/upload/iblock/84a/84a93ec731db55271699fd715fec3a5e.pdf (дата обращения: 02.03.2020).

2. СН 512–78 Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.cntd.ru/document/901707386 (дата обращения: 18.02.2010).

УДК 621.3.049.77 (035.5)

ЭЛЕКТРОННЫЕ НАГРУЗКИ

И.А. Королёв, И.В. Калиновский, студенты

Научный руководитель Р.С. Мельников, нач. отд. метрологии

г. Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ

Представлена общая информация об электронных нагрузках. Рассмотрены их основные технические характеристики, функции, назначение и возможности применения электронных нагрузок. Материал статьи будет полезен при выборе электронной нагрузки.

Ключевые слова: электронная нагрузка, постоянный ток, переменный ток, источник питания, аккумулятор, нагрузка, мощность, батарея.

Потребность в электронных нагрузках вызвана, в первую очередь, необходимостью тестирования источников питания, работающих в различных специальных режимах, приближенных к реальным условиям работы. Использование электронных нагрузок в простых испытаниях часто преследует цель автоматизации испытаний, а при больших мощностях еще и энергосбережения.

Назначение и функции электронных нагрузок. Электронные нагрузки позволяют тестировать различные типы источников питания – от автомобильных аккумуляторов до солнечных батарей и трансформаторов. Такая проверка заключается в имитации нагрузки источника питания, в ходе которой могут изменяться условия протекания тока

нагрузки. Так, устройство способно изменять собственное сопротивление в соответствии с заданным алгоритмом, имитировать короткое замыкание, высокий пусковой ток и т.д. Это позволяет в полной мере оценить возможности источника питания в условиях, максимально приближённых к реальным. Например, используя некоторые электронные нагрузки, можно выставить значение конечного напряжения и времени протекания тока нагрузки таким образом, чтобы по итогу испытания получить точное значение времени разрядки аккумуляторной батареи. Для фиксирования показаний проверки источника питания электронная нагрузка снабжена встроенным в корпус мультиметром, способным измерять значения основных электрических характеристик, таких как сила тока, напряжение и мощность [1].

Разновидности электронных нагрузок и их технические характеристики. Существует множество разновидностей электронных нагрузок широкой номенклатуры. Условно их можно разделить на электронные нагрузки малой (менее 100 Вт), средней (менее 1 кВт), высокой (более 10 кВт) мощности. При этом размер устройства будет напрямую зависеть от рассеиваемой нагрузкой мощности – если наименее мощные образцы можно без особого труда перемещать вручную, то масса высокомощных промышленных электронных нагрузок может достигать несколько десятков килограмм, а высота – превышать человеческий рост (например, серия ITECH IT8900) [2]. Все три типа, в свою очередь, включают в себя электронные нагрузки как переменного, так и постоянного тока, отличающиеся номенклатурой устанавливаемых режимов работы (таблица, рис. 1).

Режимы работы электронных нагрузок по типу тока

Переменный ток	Постоянный ток
Постоянное сопротивление (Constant Resistant)	Постоянное сопротивление (Constant Resistant)
Крест-фактор нагрузки (Crest Factor)	Постоянное напряжение (Constant Voltage)
Коэффициент мощности (Power Factor)	Постоянная мощность (Constant Power)
Короткое замыкание	Динамическая нагрузка
	Короткое замыкание

При этом номенклатура современных электронных нагрузок включает в себя образцы, способные работать с источниками постоянного и переменного тока и соответственно во всех режимах работы. Зачастую такие устройства обладают возможностью управления при помощи персонального компьютера, имея специальный разъём для подключения к нему, и оснащение осциллографом.

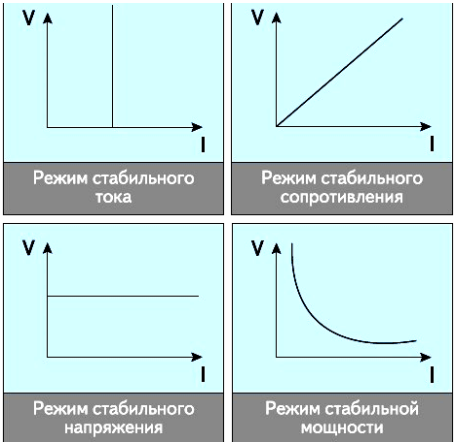


Рис. 1. ВАХ электронной нагрузки в различных режимах работы

Крупнейшими производителями электронных нагрузок являются компании Et System, H&H, Amrel, ITECH Electronics, Dana, Chroma ATE и ITECH. Перечень поставляемой продукции данных компаний составляют все существующие разновидности электронных нагрузок [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронные нагрузки компании Chroma ATE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kit-e.ru/articles/device/2011_8_182.php

2. Руководство пользователя серии мощных программируемых электронных нагрузок ITECH IT8900 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tehencom.com/Companies/ITECH/IT8900/ITECH_IT8900_IT8912_IT8915_IT8918_IT8922_IT8924_IT8930_IT8936_IT8945_User_Manual.pdf

3. Что такое электронная нагрузка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tehencom.com/Categories/Electronic_Loads/Basics/Electronic_Loads_Basics.htm

УДК 62-558

ГЕНЕРАТОР ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

Д.И. Люшневский, студент

Научный руководитель Ю.В. Шульгина, доцент ОЭИ, к.т.н.

г. Томск, НИ ТПУ, shulgina@tpu.ru

Представлен генератор прямоугольных сигналов на микросхеме EPM570T100I5 семейства MAX II фирмы ALTERA. За основу была взята технология DDS-синтеза частот.

Ключевые слова: DDS-генератор, ПЛИС.

С развитием электроники ужесточаются и требования к тестовому оборудованию для проверки модулей и изделий. Генераторы сигналов являются основным инструментом при постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик аппаратуры. Основные требования к генераторам сигналов: высокая точность, стабильность, возможность быстрой подстройки временных параметров сигнала.

При проверке одного модуля требуется: 2 выходных сигнала прямоугольной формы (сигнал включения передатчика и сигнал защиты приемника), работа генератора как от источника внешнего синхросигнала, так и без него, плавная регулировка скважности сигналов, длительности и времени задержек фронтов сигналов.

С целью увеличения количества модулей, тестируемых от одного генератора, была поставлена задача разработать генератор с 10 выходами.

Принцип работы генератора следующий: при синхронизации входным сигналом фронты входного сигнала и сигнала защиты синфазны, передний фронт сигнала включения должен быть с регулируемой задержкой относительно входного сигнала в диапазоне от 100 нс до 1 мкс. Задний фронт сигнала включения должен быть с задержкой от заднего фронта входного сигнала в регулируемом диапазоне от 100 нс до 1 мкс. Задний фронт сигнала защиты подается с регулируемой задержкой от заднего фронта сигнала включения в диапазоне от 100 нс до 1 мкс. При работе от внешнего источника длительности импульсов и скважность сигналов включения и защиты регламентируются входным сигналом. При работе без внешнего источника синхросигнала задержки между передними и задними фронтами сигналов включения и защиты остаются прежними: 100 нс – 1 мкс с возможностью плавной регулировки, и добавляется возможность плавного регулирования скважности сигналов и их длительности.

При создании генераторов существует несколько методов синтеза частот:

- Прямой аналоговый синтез (состоит из смесителя, фильтра и делителя; имеет большое количество опорных генераторов).
- Косвенный синтез с подстрокой частоты при помощи ФАПЧ. (сложность перестройки частоты и временных параметров сигналов, средняя потребляемая мощность и невысокая точность).
- Прямой цифровой синтез частот или DDS-синтезатор (быстрый переход между частотами, возможность быстрой регулировки временных параметров сигналов, малые габариты и энергопотребление, но при этом ограниченное количество выходных каналов).

Поскольку генератор разрабатывается с возможностью увеличения числа выходов до 10 и более, рационально использовать цифровой метод синтеза частот (DSS) на микросхемах ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы). Это даст необходимую для работы высокую точность по частоте, возможность быстрой перестройки и малые габариты [2].

За основу был взят принцип работы DDS-генераторов. Частота, скважность, длительность и задержка сигналов задаются счетчиком, который описан в ПЛИС [2]. Для тактирования счетчика предусмотрен кварцевый генератор с частотой 100 МГц, что позволит изменять временные параметры с шагом до 10 нс. Для удобства и экономии времени при испытании изделий предусмотрено управление посредством энкодера и кнопок, что позволит менять параметры выходных сигналов сразу без перепрограммирования ПЛИС. Цифровые значения будут представлены на 3-разрядном семисегментном индикаторе. Структурная схема разрабатываемого генератора представлена на рис. 1.

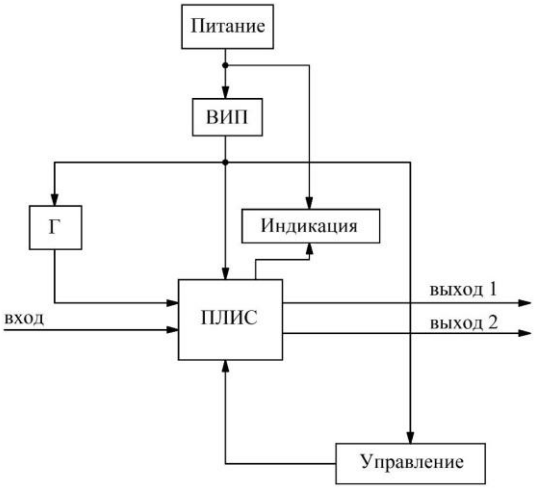


Рис. 1. Структурная схема: Г – внутренний генератор сигналов; ВИП – вторичный источник питания, понижает напряжение питания с 5 до 3,3 В. Индикация – блок индикации, отображает изменяемый параметр сигнала и его величину; управление – блок управления, меняет параметр и служит
для его плавного регулирования; ПЛИС – программируемое устройство, формирует выходные импульсы в зависимости от установленных параметров

При описании цифровой схемы работы генератора и счетчика были получены 2 выходных сигнала (при работе от входного синхросигнала). На рис. 2 представлены полученные осциллограммы.

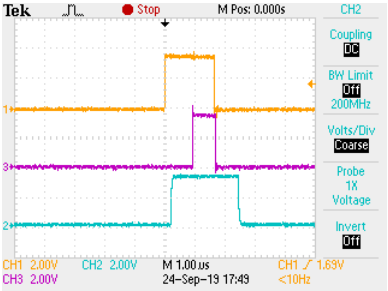


Рис. 2. Осциллограммы сигналов входа, включения и защиты

Таким образом, был разработан генератор сигналов для проверки модулей. Заданные временные задержки позволяют тестировать оборудование, исключая возможность подачи высокой мощности передатчика на выключенный канал приемника сигналов. Возможность регулировки скважности, длительности и задержек сигналов дает более гибкие возможности для тестирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплов В.Ю., Садыков Р.Р., Латыпов Р.С. Методы синтеза частот: учеб.-метод. пособие. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – С. 4, 5.

2. Hong-fei ZHANG, Chun-li LUO, Peng-yi TANG, Ke CUI, Sheng-zhao LIN, Ge JIN, Jian WANG. High-speed Arbitrary Waveform Generator based on FPGA // IEEE. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC). Seoul. – 2013. – P. 1–5.

УДК 621.314.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХПОРТОВОГО ДВУНАПРАВЛЕННОГО С СИММЕТРИЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И РЕЗОНАНСНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ

Н.С. Легостаев, проф., к.т.н.; В.А. Серов, магистрант каф. ПрЭ

г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru

Описаны особенности симметричного управления транзисторами преобразователя, представлена имитационная модель преобразователя, приведены результаты анализа имитационной модели преобразователя в среде MATLAB-Simulink.

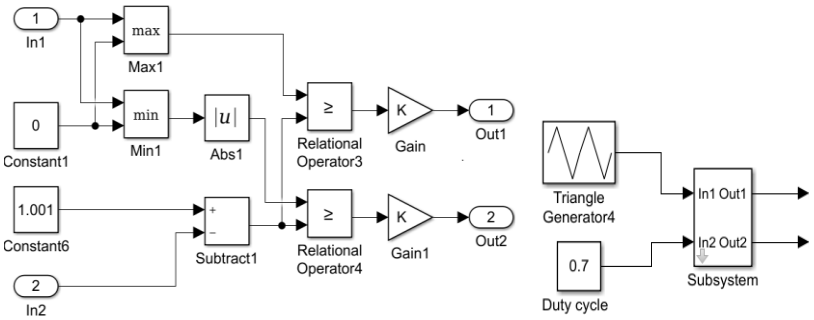
Ключевые слова: преобразователь напряжения, резонансная коммутация, управление транзисторами, симметричное управление.

Одно из перспективных решений проблемы электроснабжения направлено на разработку и внедрение интеллектуальных энергоси-

стем с активно-адаптивной сетью (SMART GRID в англоязычной литературе), основу которых, как правило, составляют возобновляемые источники энергии (ВИЭ), например, фотоэлектрические модули (ФЭМ) и ветроэнергетические установки (ВЭУ), а также различные устройства интеллектуальной силовой электроники (SMART POWER) [1].

С целью повышения эффективности использования энергии ВИЭ в интеллектуальных энергосистемах с активно-адаптивной сетью используют неизолированные, частично изолированные и полностью изолированные трехпортовые преобразователи с единой системой контроля величины и направления потоков энергии между портами, которая, в свою очередь, формирует три симметричные системы управляющих импульсов [2]. Контроль величины и направления потоков энергии между портами достигается регулированием фазовых сдвигов для управляющих импульсов преобразователей порта 2 и порта 3 относительно управляющих импульсов преобразователя порта 1, при этом для преобразователя порта 1 система является ведущей, а для управления преобразователями портов 2 и 3 системы являются ведомыми.

Модель системы управления транзисторами однофазного мостового инвертора порта 1 представлена на рис. 1, *а*, которой соответствует блок Subsystem на рис. 1, *б*. Модель формирует две противофазные системы управляющих импульсов (рис. 2). Частота управляющих импульсов задается блоком Triangle Generator (см. рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1. Модель системы управления транзисторами преобразователя порта 1

Регулирование фазового сдвига обеспечивают блоки Transport Delay в количестве, равном числу транзисторов ведомых портов.

Модель трехпортового преобразователя напряжения с симметричным управлением и резонансной коммутацией транзисторов, раз-

работанная в среде MATLAB-Simulink, показана на рис. 3. Функцию заряда/разряда накопителя электрической энергии (порт 2) выполняет двунаправленный преобразователь, при этом в режиме заряда двунаправленный поток энергии осуществляется между портами 1 и 2, а в режиме разряда – между портами 2 и 3 [3].

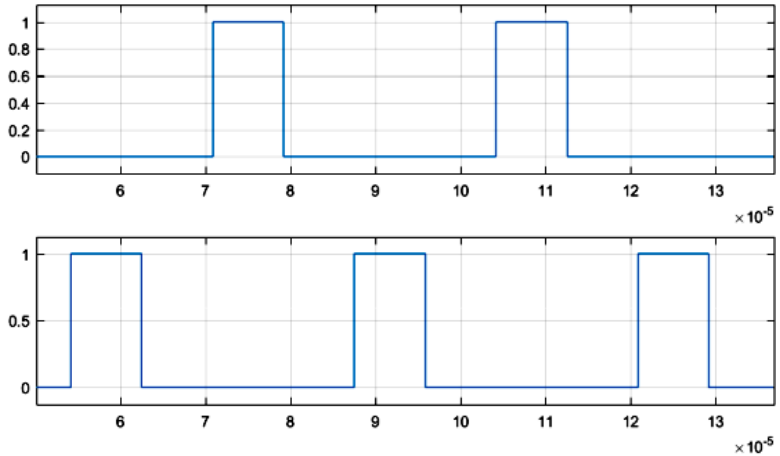


Рис. 2. Противофазные системы управляющих импульсов транзисторами преобразователя порта 1

Осциллограммы, снятые при пуске модели трехпортового преобразователя напряжения с симметричным управлением и резонансной коммутацией транзисторов, представлены на рис. 4. Значения параметров модели следующие: частота коммутации транзисторов $f_к = 30$ кГц; напряжения портов 1 и 2 $U_1 = U_2 = 15$ В; $L_к = 3$ мГн; $C_к = 10$ нФ; $U_{вых} = 239{,}2$ В; $R_н = 50$ Ом.

Модель трехпортового преобразователя напряжения с симметричным управлением и резонансной коммутацией транзисторов в среде MATLAB-Simulink обеспечивает анализ электромагнитных процессов с учетом параметров реальных компонентов схемы. Результаты моделирования с точностью, не превышающей 7%, совпадают с результатами математической модели, представленной в работе [3]. Модель правомерно использовать для исследования электромагнитных процессов и энергетических показателей полностью изолированных трехпортовых преобразователей, например автономных энергосистем на базе фотоэлектрических модулей.

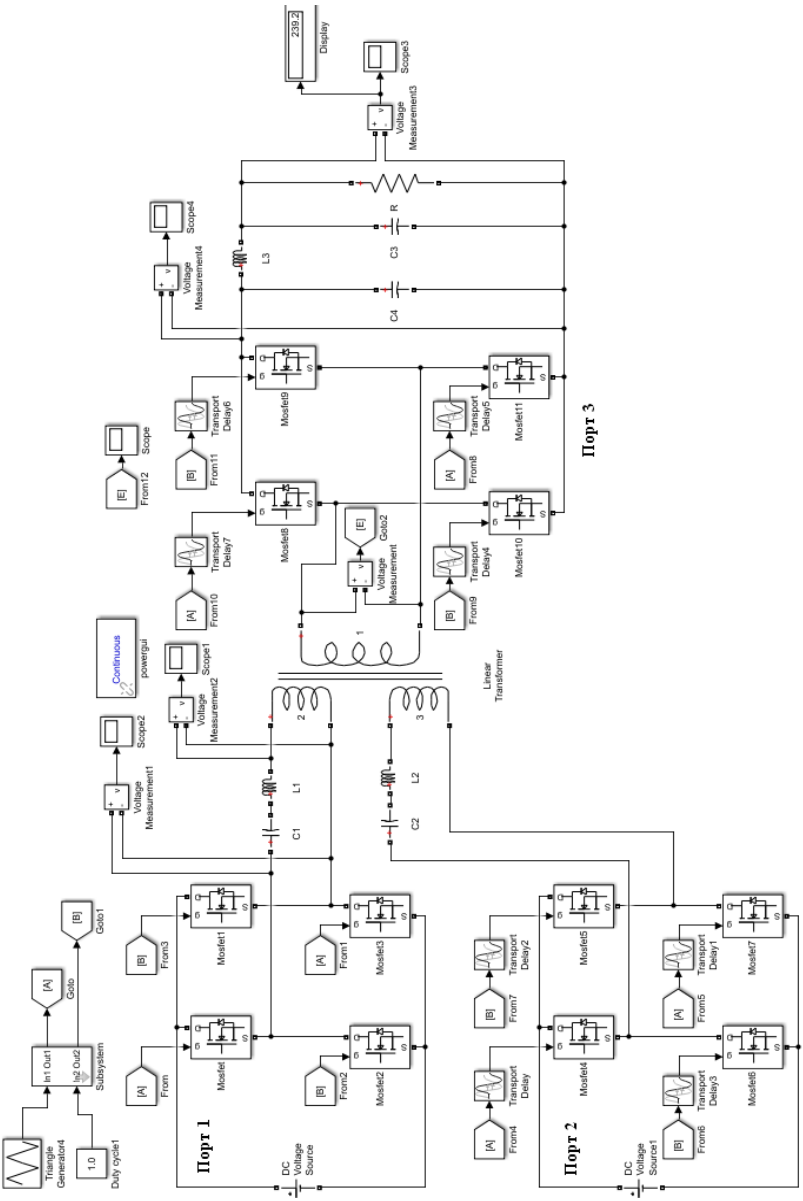


Рис. 3. Модель трехпортового преобразователя напряжения
с симметричным управлением и резонансной коммутацией транзисторов
в среде MATLAB-Simulink

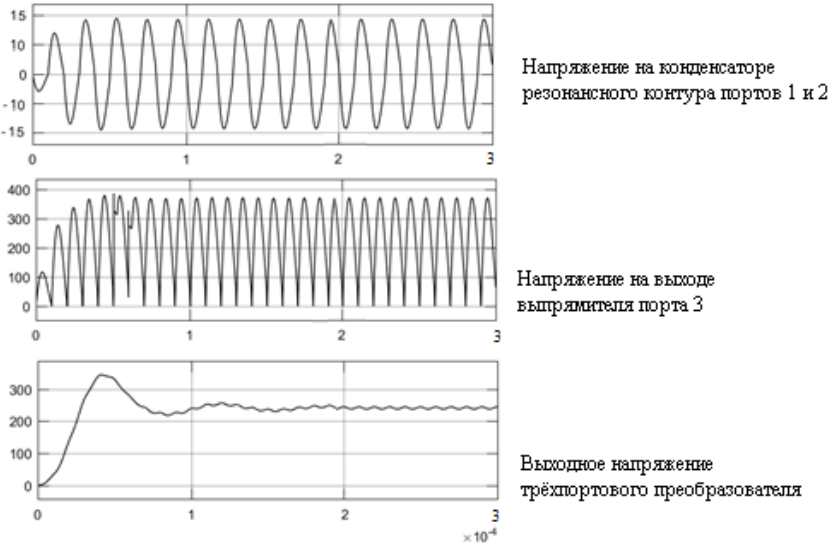


Рис. 4. Осциллограммы напряжений

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешин В.И. Разработка и производство инновационных устройств силовой электроники для энергосистем с ВИЭ // Матер. Междунар. конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». 13–14 октября 2016 г. – М.: ОИВТ РАН, 2016. – С. 226–228.

2. Gao L. A DC Microgrid Coordinated Control Strategy Based on Integrator Current-Sharing / L. Gao, Y. Liu, H. Ren Guerrero, M. Josep // MDPI journal, energies. – 2017. – Vol. 10, № 8. – P. 1116. – URL: https://vbn.aau.dk/ws/files/267071089/energies_10_01116.pdf (дата обращения: 15.01.2020).

3. Chen B. Comparative Analysis and Optimization of Power Loss Based on the Isolated Series/Multi Resonant Three-Port Bidirectional DC-DC Converter / B. Chen, P. Wang, Y. Wang, W. Li, F. Han, S. Zhang // MDPI journal, energies. – 2017. – Vol. 10, № 10. – P. 1565. – URL: https://pdfs.semanticscholar.org/5a35/0b9240d7fd7f79b0fc43970618262f4309a0.pdf (дата обращения: 15.01.2020).

УДК 621.365.63

УСТРОЙСТВО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В.А. Шарыгин, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, slava.sharygin@mail.ru

Представлены исследования индукционного нагрева магнитным полем постоянных магнитов.

Ключевые слова: индукционный нагрев, постоянные магниты, магнитное поле, частота, индукция, температура, имитационная модель.

Принцип индукционного нагрева (ИН) постоянными магнитами (ПМ) заключается в следующем: на нагреваемый металлический объект прикладывается магнитное поле, генерируемое ПМ, затем полярность ПМ, изменяясь с некоторой частотой, генерирует вихревые токи, которые, протекая через металлический объект, нагревают его.

В [1] впервые предложен способ ИН цилиндрических слитков из цветных металлов в магнитном поле ПМ. Разработана имитационная модель связанных электромагнитных и тепловых процессов в системе «нагреваемый объект – ротор с магнитами», учитывающая температурную зависимость удельной электропроводности нагрузки. Экспериментально выявлены закономерности эффективного преобразования электрической энергии в энергию магнитного поля и затем в тепловую энергию, в зависимости от геометрических параметров ПМ, высоты зубцов ротора, немагнитного зазора, магнитной проницаемости используемых материалов, числа пар полюсов, частоты вращения ротора и угла поляризации магнитов (рис. 1).

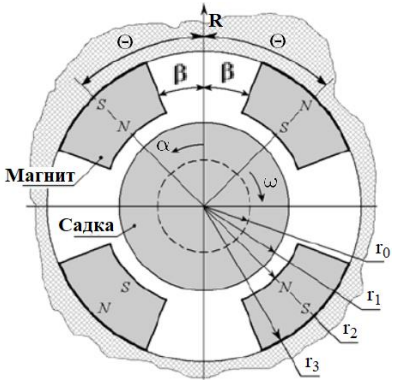


Рис. 1. Модель установки ИН с ПМ

В [2] предложен приближенный аналитический метод расчета электромагнитного поля установки ИН с ПМ с помощью каскадной схемы замещения (рис. 2), которая сформирована в цилиндрической системе координат на основе сопоставления общих законов и методов расчета электромагнитного поля и методов теории электрических цепей синусоидального тока.

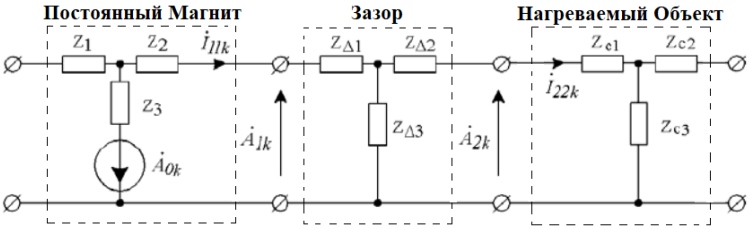


Рис. 2. Каскадная схема замещения установки ИН с ПМ

На основе данной модели и полученных материалов появилась возможность рассчитать индукцию магнитного и напряженность электрического полей установки.

В [3, 4] расчетным путем имитационного моделирования в программном пакете ANSYS были получены зависимости активной мощности от частоты вращения ПМ вокруг загрузки при различных количествах пар полюсов ПМ (рис. 3) и расстояния между ПМ. Опираясь на полученные зависимости, можно утверждать, что при увеличении числа пар полюсов, а также при уменьшении расстояния между ПМ увеличивается выделение активной мощности.

Кроме того, получена зависимость активной мощности от зазора между ПМ и нагреваемым объектом с его увеличением, выделяемая активная мощность уменьшается по экспоненциальному закону.

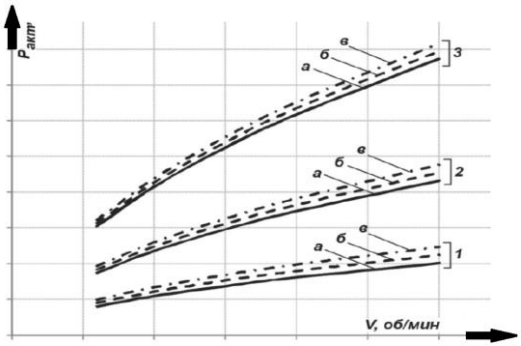


Рис. 3. Зависимость активной мощности от частоты вращения ПМ при различных количествах пар полюсов: *1* – 2 пары, *2* – 3 пары, *3* – 4 пары

Во всех рассмотренных вариантах использовалась установка ИН ПМ с загрузкой, помещающейся вовнутрь, и предполагалось ее применение на металлургических предприятиях для сквозного прогрева металлических заготовок для дальнейшей горячей обработки.

Автором предложено решение о применении данной технологии в других сферах жизни человека, и изготовлен вариант нагревателя в виде револьверного барабана с ПМ по аналогии с [4], который вращается вблизи плоского нагреваемого металлического объекта. Установка может выступать в качестве индукционной плиты. Изготовленный первый образец подтвердил эффективную работоспособность данной конструкции.

После чего принято решение о создании экспериментального макета устройства ИН ПМ для проверки энергоэффективности предложенного технического решения (рис. 4).

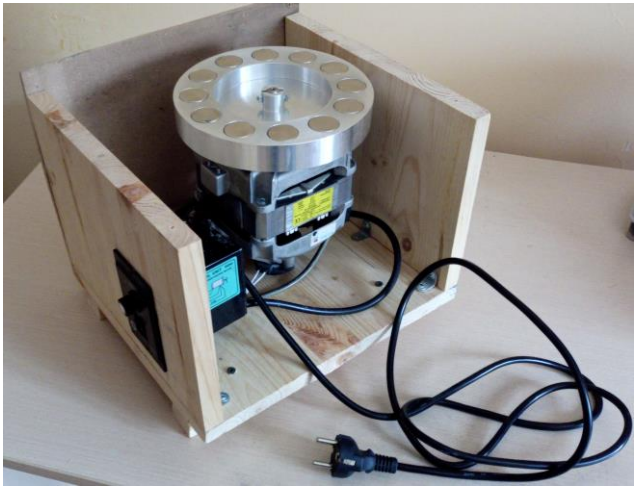


Рис. 4. Экспериментальный макет устройства ИН ПМ

В качестве вращающей силы выступает коллекторный двигатель мощностью 300 Вт, для плавного пуска подключен регулятор переменного напряжения мощностью 400 Вт, барабан изготовлен из алюминия путем фрезеровки, неодимовые магниты 12 шт. марки N52 с остаточной индукцией магнитного поля 1,4 Тл. В качестве нагреваемой заготовки использовалась пластина толщиной 1 мм и диаметром 150 мм.

Заключение. В ходе проведенных испытаний установлено, что при вращении барабана с ПМ магнитное поле создает вращающую

механическую силу, прикладываемую к нагреваемой заготовке, вследствие чего появляется необходимость в жестком закреплении нагреваемого объекта, кроме того, данная сила влияет и на скорость вращения барабана. В данном макете крутящего момента двигателя оказалось недостаточно для поддержания нужной скорости вращения барабана с ПМ. Двигатель необходимо заменить на более мощный до 1000 Вт с крутящим моментом 10 Н/м.

Также была подтверждена высокая эффективность нагрева заготовки барабаном с ПМ путем раскручивания его до максимально возможной частоты вращения на холостых оборотах, затем торможения заготовкой на расстоянии 5 мм от магнитов, время торможения составило 3,5 с, алюминиевая пластина при этом нагрелась до ~50 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов К.А. Повышение энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую при вращении постоянных магнитов вокруг цилиндрической загрузки: дис. … канд. техн. наук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dissercat.com/content/povyshenie-energeticheskoi-effektivnosti-preobrazovaniya-elektricheskoi-energii-v-teplovuyu- (дата обращения: 18.02.2020).

2. Инкин А.И., Бланк А.В., Алиферов А.И., Порсев Е.Г., Промзелев В.А. Исследование электромагнитных параметров установок индукционного нагрева с постоянными магнитами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-elektromagnitnyh-parametrov-ustanovok-induktsionnogo-nagreva-s-postoyannymi-magnitami/viewer (дата обращения: 18.02.2020).

3. Алиферов А.И., Бикеев Р.А., Бланк А.В., Мореев А.Э., Тимофеев В.И. Исследование энергетических параметров систем индукционного нагрева с магнитами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://journals.nstu.ru/vestnik/download_article?id=2266 (дата обращения: 18.02.2010).

4. Бикеев Р.А., Промзелев В.А., Бланк А.В., Мореев А.Э. Особенности нагрева немагнитных изделий прямоугольного сечения во вращающемся поле постоянных магнитов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-nagreva-nemagnitnyh-izdeliy-pryamougolnogo-secheniya-vo-vraschayuschemsya-pole-postoyannyh-magnitov/viewer (дата обращения: 18.02.2020).

5. Лепешкин А.Р. Новый метод нагрева вращающихся дисков с использованием постоянных магнитов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-metod-nagreva-vraschayuschihsya-diskov-s-ispolzovaniem-postoyannyh-magnitov/viewer (дата обращения: 18.02.2020).

УДК 620.197.5

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО АППАРАТАМ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Шарыгин, аспирант каф. ПрЭ, инж.-констр.
Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, slava.sharygin@mail.ru
г. Томск, АО НПЦ «Полюс», info@polus-tomsk.ru

Представлены обзор литературы и технических решений, посвященных катодной защите металлических конструкций, а также предложение автора об улучшении существующих достижений в данной области.
Ключевые слова: катодная защита, коррозия, импульсный ток.

Принцип катодной защиты (КЗ) заключается в подаче отрицательного потенциала на защищаемую металлическую деталь, а положительного на анод, т.е. металлический электрод, подвергающийся коррозии вместо защищаемой детали.

Ток для КЗ с заданными параметрами вырабатывает специальное устройство – станция КЗ – источник вторичного электропитания, который подключается к питающей сети (~220 В).

Станции КЗ бывают двух типов: трансформаторные и инверторные, подающие отрицательное напряжение на нагрузку. Они могут иметь различные режимы стабилизации и соответственно различные функциональные возможности. Их выходная мощность варьируется в диапазоне от 1 до 10 кВт [1].

Станции прошлых лет – это низкочастотные трансформаторы с тиристорными регуляторами (рис. 1) [2].

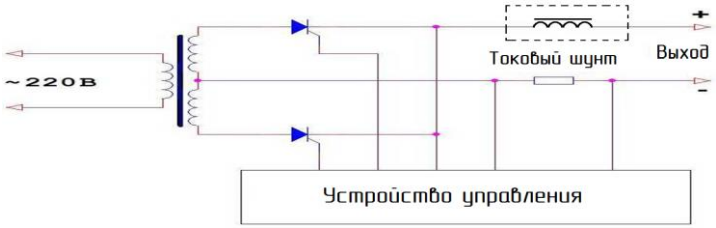


Рис. 1. Функциональная схема станции КЗ трансформаторного типа

Основные недостатки трансформаторных устройств КЗ – низкий КПД вследствие потерь в магнитных элементах и высокий коэффициент пульсаций. Для улучшения этих параметров в схему устройства

добавляют низкочастотный дроссель. Так как его размеры и масса примерно такие же, как и у трансформатора, общие масса и габариты возрастают вдвое. При этом коэффициент пульсаций и мощность у станций со сглаживающим дросселем все равно значительно хуже, чем у современных аналогов.

Большинство современных станций – это инверторные преобразователи с цифровым управлением и приборами телеметрии.

Нагрузкой для устройства КЗ является электрическая цепь: анодное заземление – почва – изоляция металлического объекта. Поэтому требования к выходным энергетическим параметрам таких станций прежде всего определяют:

– сопротивление анод – грунт;

– сопротивление грунта;

– сопротивление изоляции объекта.

Главное достоинство инверторных станций в том, что размеры силового трансформатора в десятки раз меньше благодаря увеличению частоты преобразования напряжения, что позволяет минимизировать потери энергии, уменьшить индуктивность и емкость сглаживающих фильтров и уровень пульсаций на выходе, повысить КПД всего устройства.

Кроме того, предложено решение [3] подавать на нагрузку импульсный ток, что позволяет на порядок уменьшить затраты электроэнергии и продлить срок службы анода. На схеме станции инверторного типа с использованием поляризации импульсным током (рис. 2): AC/DC – выпрямитель; Т – силовой трансформатор; DC/AC – инвертор; ИПН – импульсный преобразователь напряжения; ЭС – электрод сравнения; a_1 – управляющий выход инвертора DC/AC; a_2 – управляющий выход ИПН; $u_з$ – задающее напряжение.

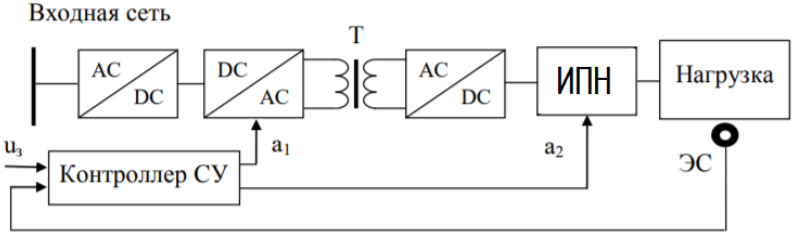


Рис. 2. Функциональная схема станции КЗ инверторного типа с использованием поляризации импульсным током

Применение импульсной поляризации позволяет значительно сократить расходы электроэнергии на работу КЗ. Станция КЗ на посто-

янном токе может вызывать эффект перезащиты, заключающийся в выделении водорода и внедрении его в защищаемую конструкцию, что приводит к повышению расходов электроэнергии, охрупчиванию стали и повреждению изоляционного покрытия. Применение импульсной КЗ значительно снижает риск наводороживания и позволяет сохранить механические свойства защищаемой конструкции [4].

Исследования импульсной поляризации при различных режимах [5], когда нагрузкой служила стальная труба, а электролитом – водопроводная вода (таблица), свидетельствуют, что массовый показатель скорости растворения трубной стали при импульсной поляризации значительно снижается по сравнению с массовым показателем стали, поляризованной при постоянном токе, потенциал защиты при этом лежит в требуемых пределах.

Результаты исследования поляризации при различных режимах работы

Режим поляризации	H, кг/мм^2	$\sigma_в$, МПа	Массовый показатель, г/см^2*ч
Исходный образец	191,6	57,48	–
$t_{имп}$ = 1 с, $t_{паузы}$ = 4 с	644,0	193,2	0,000034
$t_{имп}$ = 1 с, $t_{паузы}$ = 8 с	594,0	178,2	0,000026
$t_{имп}$ = 0,1 с, $t_{паузы}$ = 4 с	220,0	66	0,000017
$t_{имп}$ = 0,1 с, $t_{паузы}$ = 8 с	644,0	193,2	0,000003
Постоянный ток	594,0	178,2	0,000456

Таким образом, наиболее эффективно подавать на нагрузку (трубу) импульсный ток при длительности импульса 0,1 с и длительности паузы 8 с. Данный режим работы способен обеспечить наибольшую экономию электроэнергии и наименьшую растворяемость металлической конструкции в электролите.

Схемотехническое решение по установке после выпрямителя дополнительного функционального блока импульсного преобразователя напряжения (см. рис. 2) можно упростить. Так как время импульсов составляет 0,1 с, временем переходного процесса можно пренебречь, благодаря чему возможно реализовать в системе управления принцип включения и выключения инвертора таким образом, чтобы на нагрузке формировались импульсы необходимой длительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катодная защита от коррозии. Принцип действия. Основные понятия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mypractic.ru/katodnaya-zashhita-ot-korrozii.html (дата обращения: 28.01.2020).

2. Станции катодной защиты. Характеристики, параметры, классификация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mypractic.ru/stancii-katodnoj-zashhity.html (дата обращения: 28.01.2020).

3. Марухин К.В. Станция катодной защиты импульсным током подземных металлических трубопроводов: дис. … канд. техн. наук. – Саратов, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dissercat.com/content/stantsiya-katodnoi-zashchity-impulsnym-tokom-podzemnykh-metallicheskikh-truboprovodov (дата обращения: 28.01.2020).

4. Наботова А.С. Повышение эффективности катодной защиты при использовании импульсной поляризации: дис. … канд. техн. наук. – Саратов., 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-katodnoi-zashchity-pri-ispolzovanii-impulsnoi-polyarizatsii (дата обращения: 28.01.2020).

5. Лазаренко А.С., Савельева Е.А. Влияние импульсной катодной поляризации на величину потенциала и свойства трубной стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-impulsnoy-katodnoy-polyarizatsii-na-velichinu-potentsiala-i-svoystva-trubnoy-stali (дата обращения: 28.01.2020).

УДК 621.316.91

ИСКРОБЕЗОПАСНЫЕ ЦЕПИ КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ

И.О. Суховерков, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель Г.Я. Михальченко, проф. каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, syhoverkovio@gmail.com, mgy@ie.tusur.ru

Приводится описание метода обеспечения взрывозащиты путём ограничения параметров тока и напряжения. В статье рассмотрены основные пункты ГОСТа, необходимые для выполнения, при проектировании и анализе искробезопасных источников питания. Материал статьи полезен при первом знакомстве со взрывозащитой.

Ключевые слова: искробезопасность, защитные цепи, взрывоопасные среды, стандарты защиты.

Искробезопасная электрическая цепь – вид взрывозащиты, основанный на ограничении электрической энергии в оборудовании и соединительной проводке, которые подвергаются воздействию потенциально взрывоопасной среды, до значения ниже уровня, вызывающего воспламенение от искрения или нагрева [1]. Данная цепь гарантирует, что при заданных условиях шанс воспламенить взрывоопасную среду не больше 0,001. Цепи такого типа активно применяются в горношахтной промышленности, нефтегазовой отрасли, а также при работе в любой взрывоопасной среде (газы, пыли, взвеси). В цепь, в которой в предписанных стандартом ГОСТ 31610.11–2012 [1] условиях, включая нормальные условия эксплуатации и указанные условия неисправности, никакие искрения или тепловые воздействия не вызывают воспламенения данной взрывоопасной среды.

Обеспечение искробезопасности источника питания в общем виде достигается следующими путями:

1. Доказательством неповреждаемости всех элементов схемы. Для этого необходимо выдержать полуторакратный запас по току, напряжению и мощности для всех элементов схемы.

2. Гарантированными зазорами между элементами электрической цепи.

3. Расчётами всех входных цепей на номинальную работу, при наличии защитных каскадов в случае, если входное напряжение или ток могут оказаться выше номинального (в случае повреждения источников).

4. Наличием в выходных цепях цепи ограничения напряжения (защита от перенапряжений) и тока (защита в случае короткого замыкания).

Любой искробезопасный источник питания в общем виде состоит из двух видов цепей: силовых и цепей управления.

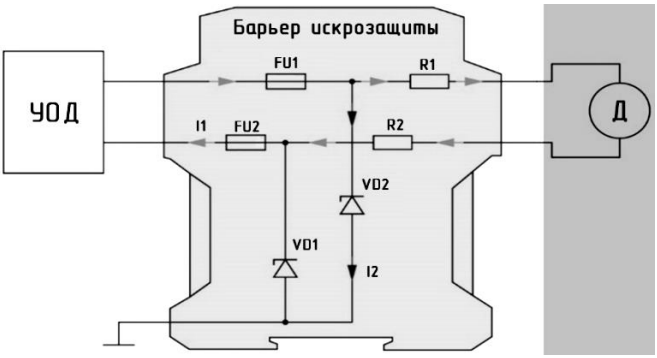


Рис. 1. Барьер искрозащиты цепи управления:
УОД – устройство опроса датчиков, Д – датчик

Принцип работы искрозащитного барьера основан на ограничении тока и напряжения в защищаемой цепи. Обычно датчик находится во взрывоопасной среде, а устройства обработки сигналов – во взрывобезопасной (корпус). На рис. 1 видно, что линии, идущие от УОД до датчика, имеют по одному предохранителю (FU1 и FU2) и стабилитрону (VD1 и VD2) на каждый проводник. В общем виде это даёт возможность ограничить ток по линии и нейтрализовать всплески напряжения на проводниках. Резисторы R1 и R2 предназначены для того, чтобы в случае низкого входного импеданса датчика и срабатывания стабилитрона ток протекал именно в стабилитроне, выводя из строя предохранитель.

Что касается источников питания в целом, то схема выглядит следующим образом.

На рис. 2 можно видеть как цепи управления, так и силовые цепи. Цепь оптопары в данном случае не нуждается в цепи искрозащиты, так как её выход не имеет источника питания. Силовая же цепь гальванически развязана трансформатором и имеет предохранитель FU, стабилитрон VD и добавочное сопротивление R. Все три элемента выходной цепи устанавливаются так же, как и в схеме на рис. 1, но с той разницей, что они рассчитаны на ток одной направленности.

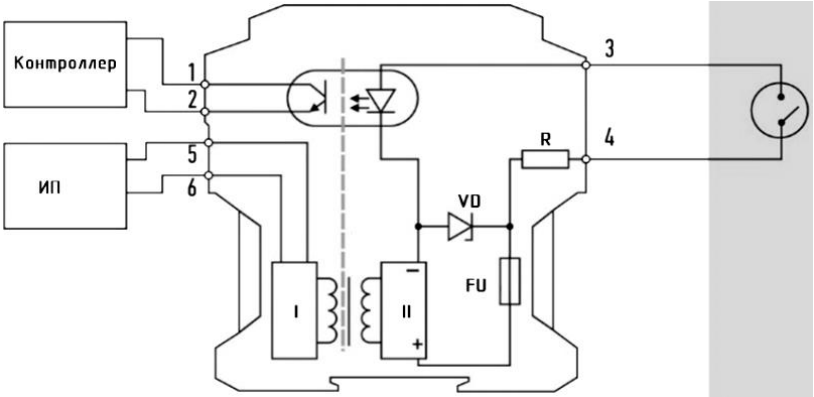


Рис. 2. Барьер искрозащиты источника питания

В качестве нагрузки на рис. 2 приведён искрообразующий механизм. Он представляет собой два вращающихся барабана, на одном из которых располагается вольфрамовая нить, которая производит короткое замыкание выхода с заданной частотой. Барабаны расположены во взрывоопаной среде. Если энергия искры, которая образуется в результате короткого замыкания, окажется больше положенной, то в среде произойдёт взрыв.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31610.11–2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Ч. 11: Оборудование с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i». Дата введения 2016-12-01. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200121999 (дата обращения: 10.01.2020).

УДК 621.316.91

ПРИНЦИП РАБОТЫ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СХЕМЫ ОГРАНИЧИТЕЛЬНОГО ШУНТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

И.О. Суховерков, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель Г.Я. Михальченко, проф. каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, syhoverkovio@gmail.com, mgy@ie.tusur.ru

Проведено описание части искрозащитного барьера с точки зрения его функционирования и безопасности согласно ГОСТ 31610.11–2014 [1]. Данный метод оценки работоспособности и критических режимов работы защитных цепей и выходных каскадов является обязательным при разработке искробезопасных источников питания. Сама же схема ограничительного шунта может использоваться как универсальный блок защиты от перенапряжений для устройств, работающих во взрывоопасной среде. Статья может служить методикой расчета искробезопасных цепей.

Ключевые слова: искробезопасность, защитные цепи, взрывоопасные среды.

Схема ограничительного шунта (далее – ОШ) используется в устройствах, в которых необходимо обеспечить защиту выходных каскадов. Основной задачей этой схемы является шунтирование нагрузки элементом с низким сопротивлением, т.е. короткое замыкание выходов схемы, без допуска протекания тока на выход.

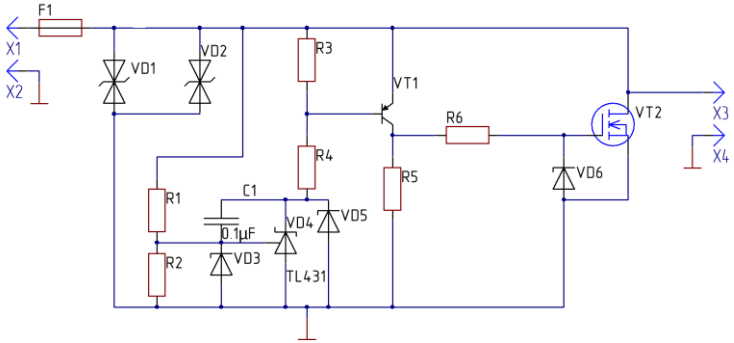


Рис. 1. Схема ограничительного шунта

На рис. 1 изображена схема ограничительного шунта. Из её принципа работы можно сделать вывод, что функционально она представляет собой стабилитрон – в случае превышения напряжения выходной транзистор VT2 открывается и накоротко замыкает выход.

На входе схемы расположен предохранитель. Согласно ГОСТу [1], его расчётный ток будет в 1,7 раза выше, чем заявленный производителем. Также следует учесть полуторакратный запас по току для элементов схемы. В соответствии с этим расчётный ток, протекающий по линии, будет в 2,55 раза выше, чем номинальный ток схемы. Для того чтобы защитить питаемое устройство от перенапряжения, в данной схеме установлены двунаправленные TVS-диоды VD1 и VD2. В штатном режиме они замкнут цепь в случае превышения напряжения или попадания в цепь повышенного напряжения любой полярности.

Однако с точки зрения ГОСТа они не являются гарантами отсутствия повышенного напряжения, так как должны выдерживать без разрушения максимальный ток и максимальное напряжение в продолжительном режиме. А в технической документации гарантии поддержания тока короткого замыкания приведены только для коротких режимов работы.

Для таких случаев и используется схема ограничительного шунта. Резисторами R1 и R2 задаётся напряжение срабатывания регулируемого параллельного стабилизатора напряжения. Делитель напряжения подбирается таким образом, чтобы напряжение на управляющем электроде, при заданном напряжении срабатывания, было равно 2,5 В. В этом случае микросхема начинает проводить ток в направлении катод-анод, открывается транзистор VT1, который, в свою очередь, открывает транзистор VT2, шунтирующий выход. Весь ток протекает по контуру F1 VT2, что обеспечивает срабатывание предохранителя и размыкание цепи протекания тока. Стоит заметить, что нормальная работа такой защиты возможна только при условии, что сопротивление открытого канала много меньше, чем входной импеданс нагрузки.

Однако основные сложности возникают при анализе аварийных режимов работы. Для этого мысленно проводится следующий эксперимент: все полупроводниковые элементы замыкаются и размыкаются в произвольном порядке. И если разрывы в полупроводниковых элементах не так критично влияют на выход из строя схемы, то короткие замыкания могут вызывать выделение большого количества тепла на других элементах.

Из сказанного следует, что при рассмотрении работы схемы следует учитывать то, что все транзисторы или любые другие полупроводниковые элементы могут выходить из строя, закорачивая при этом соответствующие контакты в любой комбинации. На рис. 2 обозначены пять самых опасных контуров протекания тока. Также при расчёте необходимо учесть, что напряжение на входе может быть выше номинального. Так, например, если по входу расположен обратноходовой

преобразователь, то максимальное напряжение, которое возможно получить в случае пробоя выпрямительного диода, будет равно напряжению первичной обмотки, делённому на коэффициент трансформации.

Как видно из рис. 2, напряжение будет приложено к контурам: *1* – резисторы R1 и R2; *2* – в случае замыкания любого из VD3-VD5 – R3 и R4; *3* – в случае пробоя базо-коллекторного перехода транзистора R3 и R5; в случае пробоя эмиттер-коллекторного перехода VT2–R5; и если в этом режиме пробьётся ещё и VD6–R6. Все вышеперечисленные контуры должны держать максимальное напряжение и иметь полуторный запас по мощности в таком режиме работы. Для этого оцениваем их отдельно. Габариты и размеры элементов в итоге выбираем исходя из большего значения мощности.

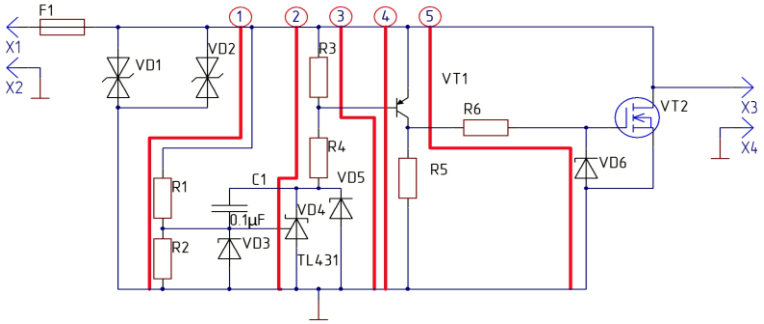


Рис. 2. Контуры пробоев полупроводниковых элементов

Выводы. Для обеспечения защиты устройства от перенапряжения, согласно ГОСТ 31610.11–2014, мало установки защитных TVS-диодов. Необходимо устройство или схема, которая способна обеспечить протекание тока короткого замыкания в искробезопасной зоне, не отключая выходные контакты. Таким требованиям соответствует схема ограничительного шунта. Однако для соответствия требованиям ГОСТа напряжение, ток и мощность схемы увеличиваются полуторакратно. Также все полупроводниковые элементы подвергаются условному повреждению на разрыв и пробой. Таким образом, должен корректироваться расчёт по мощности для пассивных элементов схемы. И, наконец, исходя из всех расчётов, должен выбираться максимальный уровень мощности, рабочего напряжения и тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31610.11–2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. Ч. 11: Оборудование с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь «i». Дата введения 2016-12-01. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200121999 (дата обращения: 10.01.2020).

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 535.215.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОФОКУСИРОВКИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Д.К. Романенко, А.В. Сокольников, М.Н. Гаппарова,
студенты каф. СВЧиКР
Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, romanenko_dima1999@mail.ru
Проект ГПО СВЧиКР-1807 «Разработка метода формирования и создание фотонных волноводных схем на основе сегнетоэлектрических кристаллов ниобата лития»

Приведены результаты исследования эффекта самофокусировки при компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в сегнетоэлектрическом кристалле ниобата лития.
Ключевые слова: ниобат лития, пространственный солитон, взаимодействие, фоторефрактивный эффект, дифракционная расходимость, электрооптический эффект, пироэлектрический эффект.

Сегнетоэлектрический кристалл ниобат лития является одним из самых распространенных материалов для изготовления оптических волноводов, которые, в свою очередь, являются базовыми элементами современных интегрально-оптических схем. Существуют различные способы формирования волноводных структур в этом кристалле, но многие из них отличаются сложной технической реализацией. Относительно простым и экономичным является метод оптического индуцирования [1]. Суть метод заключается в том, что формирование волноводных структур происходит путем модуляции показателя преломления кристалла при проявлении фоторефрактивного и пироэлектрического эффектов [2]. Важным параметром при компенсации дифракционной расходимости является изменение температуры кристалла.

Целью данной работы является исследование эффекта самофокусировки при компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в сегнетоэлектрическом кристалле ниобата лития.

В экспериментах использовался нелегированный кристалл ниобата лития с размерами 20×7×1 мм^3 вдоль осей *X*, *Y*, *Z* соответственно. Поляризация света соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Источником излучения являлся твердотельный лазер YAG:Nd^{3+}. Нагрев образца осуществлял элемент Пельтье TEC1-127060-40 с габаритами 40×40×4 мм^3. Температура регистрировалась мультиметром Mastech MY64 с термопарой. Мощность лазерного излучения регистрировалась на Thermal Power Sensors PM100D.

В таблице приведены параметры проведённого эксперимента.

Параметры эксперимента

Мощность лазерного излучения, *P*	150 мкВт
Длина волны светового излучения, λ	532 нм
Интенсивность, *I*	191 Вт/см^2
Диаметр светового пучка на входной грани кристалла, $W_{вх}$	10 мкм
Изменение температуры, *T*	от 20 до 50 °C

На рис. 1 приведены результаты экспериментального исследования эффекта самофокусировки при компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в сегнетоэлектрическом кристалле ниобата лития.

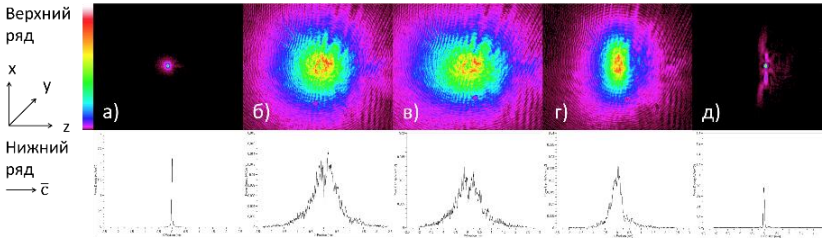


Рис. 1. Картины распределения интенсивности световых полей (верхний ряд) и соответствующие им профили (нижний ряд): *а* – на входной грани кристалла; *б* – на выходной грани кристалла в начальный момент времени; *в* – на выходной грани образца спустя 2 мин; *г* – при нагреве кристалла до 40 °C; *д* – при полной компенсации дифракции светового пучка (47 °C)

Как видно из рис. 1, *б*, на выходной грани кристалла размер световых пятен увеличивается. Это следствие линейной и нелинейной дифракции светового поля. На рис. 1, *в* видно, как спустя небольшой промежуток времени пятно стало более «овальным». Индуцированная оптическая неоднородность приводит к увеличению дифракционной расходимости светового пучка в направлении оптической оси кри-

сталла (в данном случае горизонтально). При нагревании образца наблюдается эффект самофокусировки, когда линейная и нелинейная дифракции светового пучка компенсируются (см. рис. 1, *г*, *д*), и световые пятна на выходной плоскости уменьшаются до их размеров на входной (см. рис. 1, *д*).

На рис. 2 представлены зависимости диаметра светового пятна от времени (*а*) и температуры (*б*).

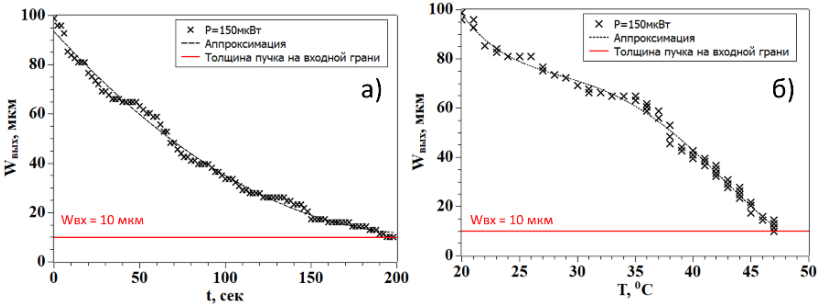


Рис. 2. Графики зависимости диаметра светового пятна ($W_{вых}$, мкм): от времени нагрева (t, с) с 20 до 50 °С – *а*; от температуры (T, °С) – *б*

При нагревании до температуры 47 °С линейная и нелинейная дифракция светового пучка компенсируются, и световые пятна на выходной плоскости уменьшаются до их размеров на входной. При указанных условиях эксперимента время, необходимое для полной компенсации дифракции светового поля, составляло примерно 3,5 мин.

Таким образом, в данной работе был исследован эффект самофокусировки при компенсации дифракционной расходимости лазерных пучков в сегнетоэлектрическом кристалле ниобата лития. Экспериментально показано, что при повышении температуры линейная и нелинейная дифракции светового пучка компенсируются, и световые пятна на выходной плоскости уменьшаются до их размеров на входной. При данных условиях эксперимента эффект самофокусировки достигается при температуре 47 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-42-703018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Courjal N. et al. Lithium Niobate Optical Waveguides Microwaveguides // Emerging Waveguide Technology. – 2018. – P. 153–174.

2. Shandarov V., Ryabchenok V., Perin A. Discrete diffraction of light in 1D photonic lattice induced in lithium niobate by means of the pyroelectric effect // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 70. – P. 754–757.

УДК 535.215.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ПУЧКАХ ЭЙРИ

Е.В. Морозова, студентка каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, russ-kat@mail.ru

Проведено исследование распределений интенсивности света в одномерных и двумерных пучках Эйри. Представлены Эйри-подобные распределения, производимые одномерной и двумерной фазовой функцией.

Ключевые слова: функция Эйри, одномерное и двумерное распределение интенсивности света.

Пучки Эйри впервые созданы экспериментальным путем тогда, когда обнаружилось, что пучок Эйри является преобразованием Фурье для нормального гауссова лазерного пучка с кубической фазовой модуляцией. Для этого были использованы пространственный модулятор света для создания кубического изменения фазы и линза, для создания преобразования Фурье. Поэтому все необходимые результаты привели к появлению пучков Эйри [1].

Целью настоящей работы является моделирование распределений интенсивности света, производимых одномерной и двумерной фазовой функцией Эйри.

Одномерная функция Эйри представляет собой преобразование Фурье от фазовой функции с кубической степенью аргумента для безразмерного аргумента $u \in [-5,5]$ (1) [2]:

$$A_i(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3/3+xu)} du \ . \qquad (1)$$

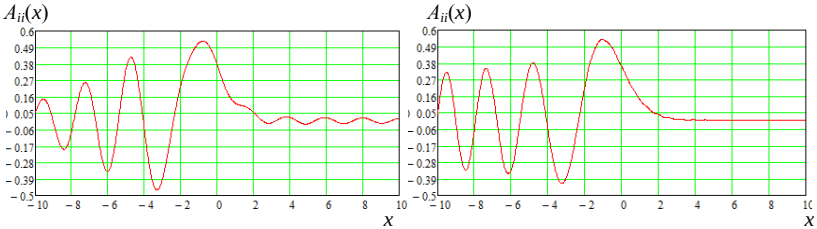
Из данной формулы видно, что при изменении безразмерного аргумента u, меняется и сама одномерная функция (рис. 1).

Классическая двумерная функция Эйри определяется как произведение одномерных функций Эйри и представлена через двумерное преобразование Фурье [2]

$$A_i(x)A_i(y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3/3+xu)} du \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3/3+yu)} dv, \qquad (2)$$

$$A_i(x)A_i(y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3+v^3)/3} \, e^{i(xu+yu)} du dv \ . \qquad (3)$$

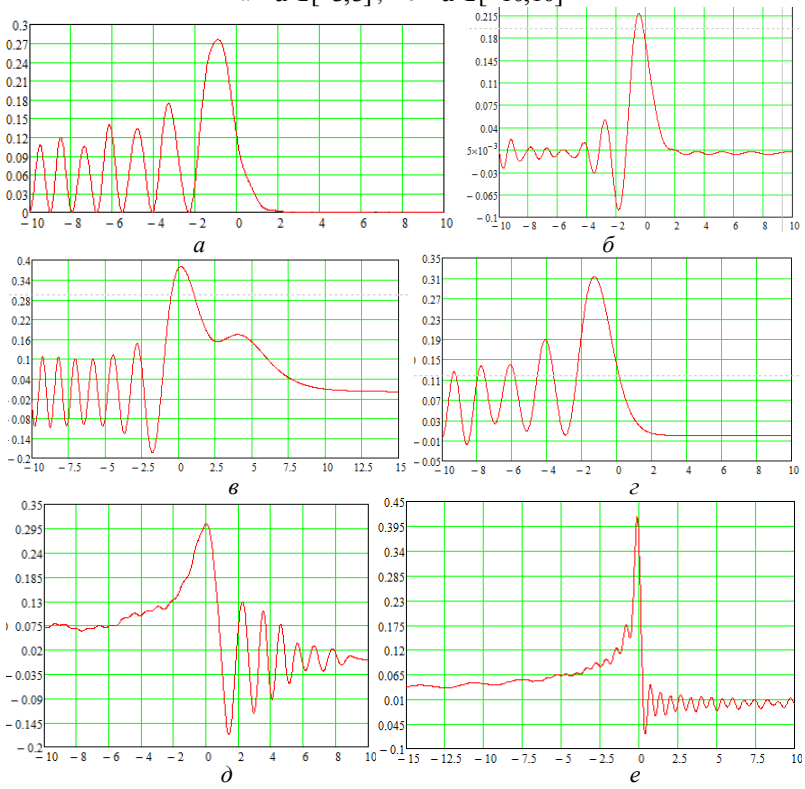
Распределение для двумерной функции Эйри представлено на рис. 2.



а *б*

Рис. 1. Эйри-подобное распределение, производимое одномерной фазовой функцией при разной величине безразмерного аргумента *u:*

$а - u \in [-3,3]$; $б - u \in [-10,10]$



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 2. Эйри-подобное распределение,
производимое двумерной фазовой функцией

Эйри-подобные распределения, производимые двумерными фазовыми функциями Эйри с различными кубическими степенями аргументов, представлены ниже [2]:

а) результат расчета преобразования Фурье от фазового распределения с кубической степенью $e^{ia(u^3+v^3)}$, где a = 1/3 (4);

б) при распределении с кубической степенью $e^{ia(u^2+v^2)u/3}$, двумерная функция имеет вид (4)

$$A_i(x)A_i(y)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(u^2+v^2)\,u/3}e^{i(xu+yu)}dudv\,; \qquad (4)$$

в) при $e^{i(u+v)uv/3}$ (5):

$$A_i(x)A_i(y)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(u+v)uv/3}e^{i(xu+yu)}dudv\,; \qquad (5)$$

г) при $e^{i(u^2+v^2)(u+v)/3}$ (6):

$$A_i(x)A_i(y)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(u^2+v^2)(u+v)/3}e^{i(xu+yu)}dudv\,; \qquad (6)$$

д) при $e^{i(u^2-v^2)u/3}$ (7):

$$A_i(x)A_i(y)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(u^2-v^2)u/3}e^{i(xu+yu)}dudv\,; \qquad (7)$$

е) при $e^{i(u^2-v^2)(u-v)/3}$ (8):

$$A_i(x)A_i(y)=\frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}e^{i(u^2-v^2)(u-v)/3}e^{i(xu+yu)}dudv\,. \qquad (8)$$

Как видно из рис. 2, распределение отображено зеркально, потому что в числителе кубической степени стоит разность между безразмерными аргументами.

Таким образом, в работе проведено исследование Эйри-подобных распределений, производимых одномерной и двумерной фазовой функцией. В пучках Эйри распределение энергии описывается, с помощью функции Эйри. Из рис. 2 видно, что функции Эйри являются бесконечно протяженными: так как они экспоненциально спадают при положительных значениях аргумента, а при отрицательных значениях показан осциллирующий характер с плохо затухающей амплитудой [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Efremidis N.K., Chen Z., Segev M., Christodoulides D.N. Airy beams and accelerating waves: an overview of recent // Optica. – 2019. – Vol. 6, № 5. – P. 686–701.

2. Хонина С.Н. Эйри-подобные двумерные распределения // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 299–311.

УДК 535.215.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

С.Б. Зыль, студент каф. СВЧиКР

Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, sema.zyl@mail.ru

Выполнены эксперименты по исследованию температурной зависимости оптического поглощения в кристалле ниобата лития. Представлены зависимости коэффициента поглощения кристалла во времени при различных температурах обжига.

Ключевые слова: кристалл, ниобат лития, коэффициент поглощения.

Кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) является уникальным материалом для исследований и применения в квантовой электронике, фотонике, нелинейной оптике. Ниобат лития применяется в изготовлении оптических модуляторов лазерного излучения, линий задержки на поверхностных акустических волнах, в генераторах оптических гармоник, для записей оптической информации и т.д. Для данных применений необходимо знать электрические, акустические и оптические свойства кристалла и иметь возможность изменять их в нужном для применения направлении [1]. Известно, что многие физические характеристики ниобата лития в диапазоне температур от +80 до 200 °С проявляют аномальный характер. Такой характер может значительно повлиять на технические характеристики устройств, которые используют элементы из $LiNbO_3$.

Для характеристики любого оптического элемента необходимо знать значение оптического коэффициента поглощения. При засветке оптического элемента, из-за частичного поглощения излучения, происходит локальный нагрев кристалла. При поглощении большого количества энергии оптические свойства элемента могут меняться, и, в конечном итоге, может произойти его разрушение [2]. Цель работы – экспериментальное исследование температурной зависимости оптического поглощения в кристалле ниобата лития.

В экспериментах по исследованию температурной зависимости оптического поглощения использовался кристалл ниобата лития $LiNbO_3$, легированный объемно ионами меди 0,05 об. %. Исследуемый образец имел размеры $3\times9\times9$ мм^3 по осям $X\times Y\times Z$ соответственно.

Экспериментальные исследования температурной зависимости оптического поглощения в кристалле ниобата лития выполнялись согласно схеме экспериментальной установки, которая представлена на рис. 1.

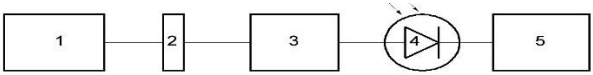


Рис. 1. Схема установки: *1* – лазер LCS-DTL-317; *2* – фильтр; *3* – кристалл $LiNbO_3$; *4* – фотодиод; *5* – цифровой мультиметр GDM-8145

В качестве падающего сигнального светового пучка использовалось лазерное излучение от полупроводникового лазера *1* с длиной волны излучения λ = 632 нм и λ = 532 нм и выходной мощностью 1 мВт. Пучок света направлялся вдоль оси *X* кристалла *3*. Для того чтобы уменьшить мощность лазера, устанавливался фильтр *2*. Измерения интенсивности света осуществлялись с помощью кремниевого фотодиода *4*, подключенного к цифровому мультиметру GDM-8145 *5*.

Зависимости коэффициента поглощения (α) кристалла во времени (*t*) при температуре обжига 250, 400, 900 ºС проиллюстрированы на рис. 2.

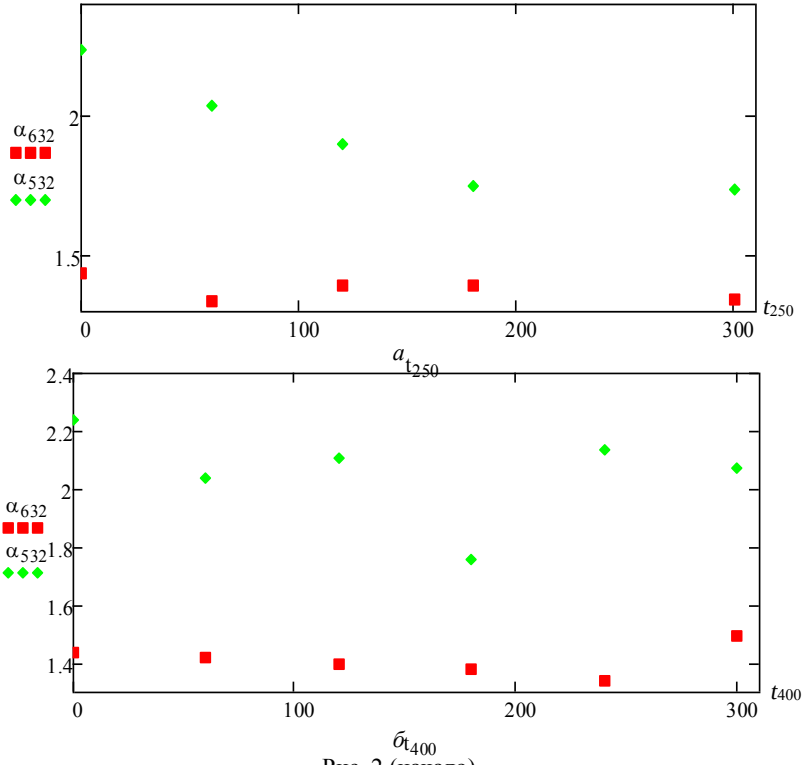


Рис. 2 (начало)

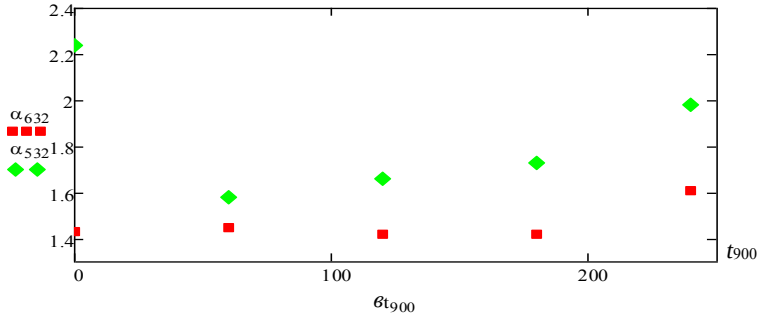


Рис. 2 (окончание). Зависимость коэффициента поглощения (α) кристалла во времени (*t*) при температуре обжига: *а* – 250 ºС; *б* – 400 ºС; *в* – 900 ºС

Наблюдения изменения оптического поглощения при температуре 250 ºС. На рис. 2, *а* продемонстрировано изменение коэффициента оптического поглощения при обжиге кристалла ниобата лития при температуре 250 ºС.

Из графика видно, что при увеличении времени обжига поглощение в кристалле при засветке зеленым лазером плавно уменьшается. А оптическое поглощение при засветке кристалла красным лазером сбалансированно (практически не изменяется).

Наблюдения изменения оптического поглощения при температуре 400 ºС. Оптическое поглощение при засветке кристалла зеленым лазером, показанное на графике (см. рис. 2, *б*), имеет изменчивый (неустойчивый) характер. Возможно, это связано с погрешностью измерений. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо при дальнейших исследованиях повторить подобный эксперимент.

Наблюдения изменения оптического поглощения при температуре 900 ºС. Оптическое поглощение при комнатной температуре перед обжигом значительно больше при засветке кристалла зеленым лазером, после обжига кристалла в течение 60 мин и более поглощение начало плавно увеличиваться, это демонстрируют графики на рис. 2, *в*. При измерениях, выполненных при засветке кристалла красным лазером, поглощение при всех термических обжигах ведет себя сбалансированно, практически без изменений. За исключением случая, когда кристалл обожгли при температуре 900 ºС в течение 240 мин – поглощение начало возрастать. В дальнейшем нужно обратить на это внимание и рассмотреть эту область при исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang, W.-S. Lithium niobate optical TE-TM mode splitter / W.-S. Wang, P.-K. Wei // US Patent.– 1995. – № 5436992.

2. Volk T. Lithium Niobate. Defects, photorefraction and ferroelectric switching / T. Volk, M. Wohlecke // Springer series in material science. – 2008. – Vol. 114. – 247 p.

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель секции – **Заболоцкий А.М.**, проф. каф. ТУ, д.т.н., доцент;*
*зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 621.3

МОДИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

О.М. Кузнецова-Таджибаева, вед. инж.-конструктор, к.т.н.
г. Томск, АО «НПЦ «Полюс», ktom75@mail.ru

Рассматривается проблема одновременного обеспечения надежности и электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры за счет реализации модального резервирования. Для совмещения основной и резервной частей схемы на плате меньшей площади двусторонняя печатная плата преобразована в многослойную. Выявлены возможности многослойной печатной платы для реализации модального резервирования.
Ключевые слова: резервирование, печатная плата, электромагнитная совместимость.

Важной задачей проектирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является обеспечение работоспособности с сохранением заданных параметров. Особенно это актуально в комплексах РЭА космических аппаратов (КА), в областях приборостроения, в которых невозможно в кратчайшие сроки обнаружить и устранить неисправность, а также присутствие условий выполнения ремонта. Поэтому широко применяется резервирование схем, которое заключается в размещении в одном объекте нескольких одинаковых печатных узлов. В штатном режиме всегда работает один из таких узлов, но в случае выхода его из строя включается его резервная копия, и устройство продолжает работать и выполнять поставленные задачи. Совместно с обеспечением надежности за счет резервирования часто предъявляются требования к электромагнитной совместимости (ЭМС) за счет простых и дешевых способов. Одним из них, использующим модальное разложение сигнала в связанных линиях, является модальная фильтрация, которую можно применить и при резервировании схем, реализуя модальное резервирование (МР) [1].

Большинство резервируемой РЭА КА содержит печатные узлы, в которых на одном основании размещены две одинаковые части рабочей схемы – основная и резервная (рис. 1), размещенные на одной стороне платы. Цель работы – представить предварительные результаты реализации МР на примере модификации двусторонней печатной платы (ДПП) с обычным резервированием.

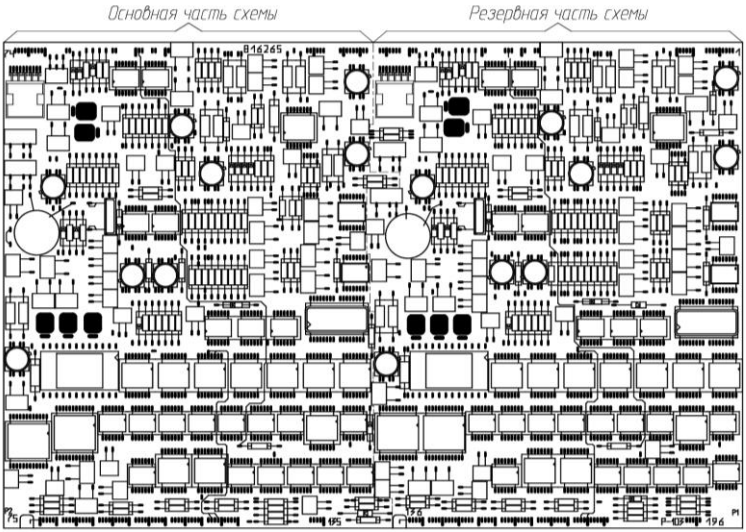


Рис. 1. Печатный узел с основным и резервным каналами

Исходная ДПП прессуется к металлическому основанию, которое является жесткой несущей конструкцией, цепью «корпус», теплоотводом. Цепи питания и общая цепь размещены на тех же двух сторонах ДПП, что и сигнальные цепи (рис. 2, 3).

Прежде всего выполнен перенос цепей земля–питание на отдельные металлизированные слои в виде полигонов, в результате чего ДПП преобразована в многослойную печатную плату (МПП). С внешних слоев печатной платы исключены цепи земля–питание, а трассировка остальных сигнальных проводников сохранена. Цепи питания под основной и резервной частями схемы выполнены отдельными полигонами, цепь земли – единым. Затем выявлены печатные проводники, которые можно расположить иначе, исключив межслойные переходы и уменьшив длину. Поэтому МПП претерпела дополнительные изменения, которые заключаются в уменьшении числа межслойных переходов с 1537 до 1475 и длин проводников, а также увеличены расстояния между печатными проводниками с 0,225 до

0,850 мм. В местах поворота печатных проводников изменен угол с 90 на 45°.

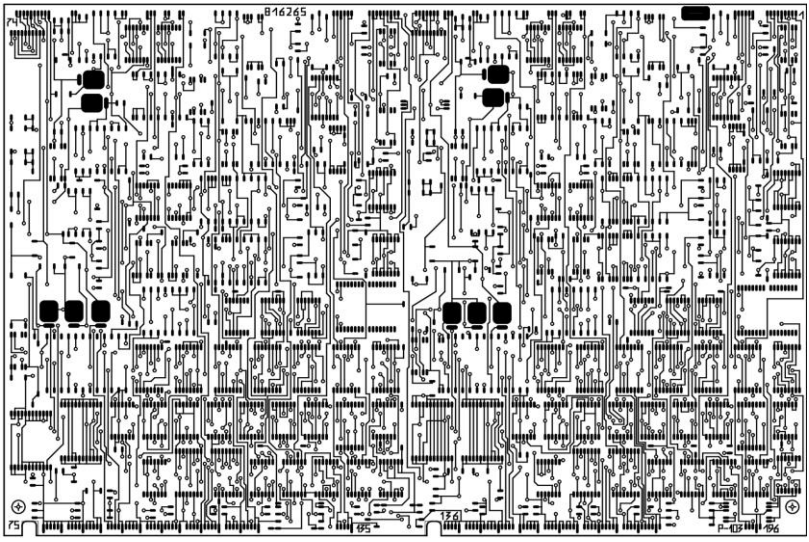


Рис. 2. Печатная плата со стороны TOP

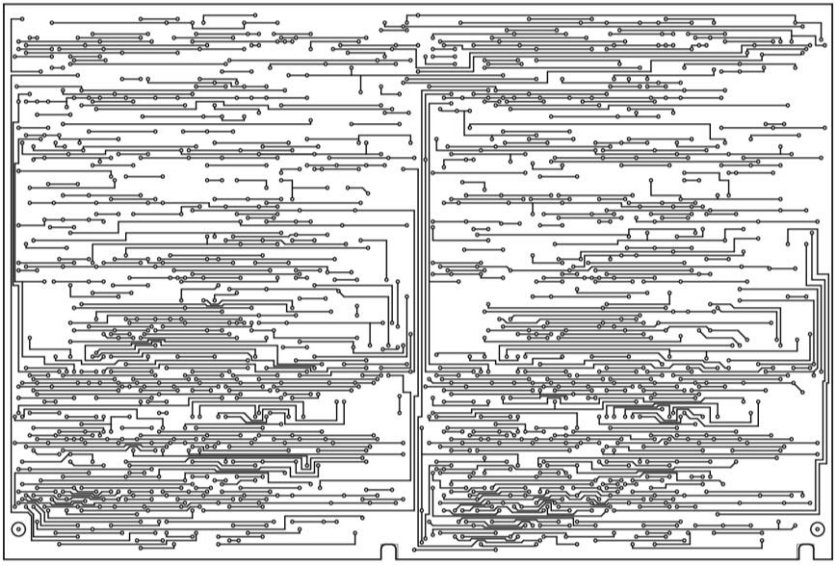


Рис. 3. Печатная плата со стороны BOTTOM

В результате модификации платы часть ее поверхности на сторонах сигнальных проводников освободилась для реализации модального резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарафутдинов В.Р., Газизов Т.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.

УДК 621.391.825

АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА ПЛОСКОГО КАБЕЛЯ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОЕДИНЕНИИ ОПОРНЫХ ПРОВОДНИКОВ

А.В. Медведев, аспирант каф. ТУ

г. Томск, ТУСУР, medart20@rambler.ru

Рассмотрены временные отклики плоского кабеля с модальным резервированием при различном соединении его опорных проводников на воздействие сверхкороткого импульса. Показано различие откликов. Выявлено, что при воздействии сверхкороткого импульса амплитуда напряжения на выходе максимальна без соединения опорных проводников, тогда как в случаях соединения примерно в 1,5 раза меньше.

Ключевые слова: модальное резервирование, плоский кабель, опорный проводник.

Резервирование является одним из способов повышения надежности, позволяющим использовать нефункционирующую часть электронного оборудования в случае неисправности в функционирующей части. Модальное резервирование (МР) – способ резервирования электрических соединений, отличающийся учётом электромагнитных связей между резервируемым и резервным проводниками резервируемой и резервной цепей [1]. Результатом является уменьшение восприимчивости резервируемой цепи к внешним кондуктивным эмиссиям. Например, предложен способ модального резервирования плоских кабелей [2], которые могут быть использованы в устройствах для соединения резервируемых узлов. Однако у этих узлов могут поразному соединяться опорные проводники. Цель работы – выполнить анализ временного отклика плоского кабеля с МР при различном соединении его опорных проводников на воздействие сверхкороткого импульса.

В системе TALGAT [3] построено поперечное сечение, показанное на рис. 1, *а*, где w = 65 мкм, s = 60 мкм, t = 5 мкм,

H = 25 мкм, h = 5 мкм, d = 500 мкм, ε_r = 4. В системе TALGAT получены погонные задержки мод τ_1, τ_2, τ_3 (3,79; 6,52; 6,49 нс/м) для исследуемой структуры. На вход принципиальной схемы, приведенной на рис. 1, *б*, подается сверхкороткий импульс с ЭДС 2 В и длительностями фронта, плоской вершины и спада по 100 пс. Резисторы $R5$ и $R6$, $R1$ и $R2$ представляют собой окончания резервируемой и резервной цепей соответственно и выбраны равными 50 Ом. Резисторы $R3$, $R4$ введены в схему для учета гальванической связи, резервной и резервируемой цепей на концах плоского кабеля. Их значения зависят от соединения опорных проводников на концах плоского кабеля. Так, если значение резистора 0,001 Ом, то опорные проводники соединены между собой, а если – 1000 Ом, то они не соединены. В работе рассмотрено 4 случая выбора номиналов резисторов $R3$ и $R4$ (все значения указаны в Ом): 1 – 0,001 и 0,001; 2 – 1000 и 1000; 3 – 0,001 и 1000; 4 – 1000 и 0,001 соответственно.

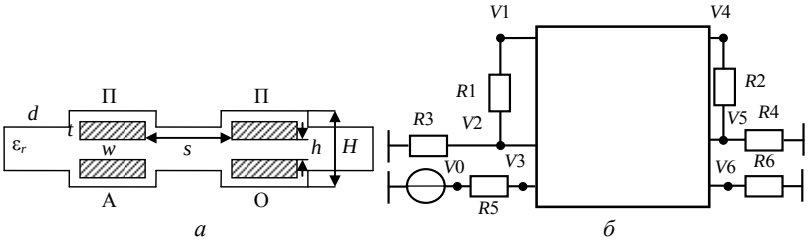


Рис. 1. Поперечное сечение структуры, где проводники:
А – активный; О – опорный; П – пассивный (*а*). Принципиальная схема (*б*)

На рис. 2 приведены формы напряжения на ближнем (узел $V3$ на рис. 1, *б*) и дальнем (узел $V6$ на рис 1, *б*) концах активного проводника в структуре с МР при различных соединениях опорных проводников. На ближнем конце активного проводника амплитуды напряжения равны 0,986; 1,075; 0,984 и 1,074 В соответственно. На дальнем конце активного проводника амплитуды напряжения первых двух импульсов разложения для четырех случаев равны 0,221 и 0,197, 0,223 и 0,323, 0,223 и 0,179, 0,223 и 0,178 В соответственно. Задержки мод по отклику соответствуют погонным, однако импульсы с задержками τ_2, τ_3 не раскладываются, так как их разность меньше длительности воздействующего импульса, хотя отраженные импульсы $3\tau_2$ и $3\tau_3$ раскладываются и приходят в интервале времени 19–20 нс.

Таким образом, выявлено, что при воздействии сверхкороткого импульса амплитуда напряжения на выходе плоского кабеля с МР максимальна при несоединении опорных проводников между собой, тогда как при их соединении она примерно в 1,5 раза меньше.

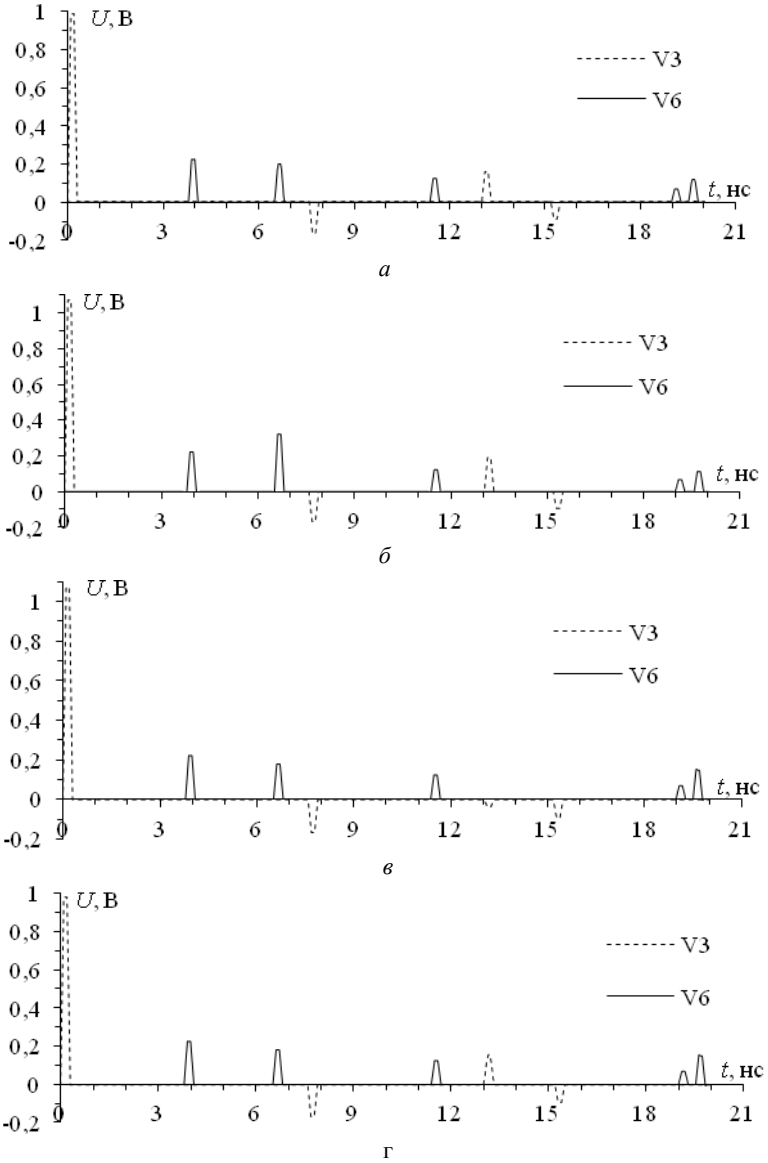


Рис. 2. Формы напряжения на ближнем (*V*3) и дальнем (*V*6) концах активного проводника в структуре с МР при вариантах соединения опорных проводников: 1 (*а*); 2 (*б*); 3 (*в*) и 4 (*г*)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00424) в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – С. 117–144.

2. Пат. 2 603 848 РФ, МПК H04B 15/00. Способ резервирования плоских кабелей / Т.Р. Газизов (РФ), П.Е. Орлов (РФ), В.Р. Шарафутдинов (РФ), О.М. Кузнецова-Таджибаева (РФ), А.М. Заболоцкий (РФ), С.П. Куксенко (РФ), Е.Н. Буичкин (РФ). – № 2 015 156 667/07; заявл. 28.12.15, опубл. 10.12.16. Бюл. № 34. – 3 с.

3. Kuksenko S.P. Preliminary results of TUSUR University project for design of spacecraft power distribution network: EMC simulation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – P. 1–7.

УДК 621.372.21

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА

Т.А. Шершнева, И.С. Марков, студенты;
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

Выполнен сравнительный анализ устройств защиты радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) от сверхкоротких импульсов (СКИ) на основе элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами.

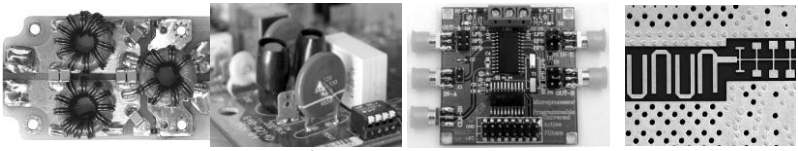
Ключевые слова: устройства защиты, микрополосковые фильтры, сверхкороткий импульс, электромагнитная совместимость.

В настоящее время пристальное внимание уделяется вопросам обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В частности, при работе высоковольтного или высокочастотного передающего оборудования могут возникать сложные переходные процессы, способные генерировать широкополосные кондуктивные помехи. Наиболее опасным видом такого рода помех является сверхкороткий импульс (СКИ), так как он обладает большой амплитудой и широким спектром [1]. Существуют различные виды помехоподавляющих устройств, применяемых для защиты РЭА от помех. Используются фильтры на элементах с сосредоточен-

ными и распределенными параметрами (микрополосковые устройства), активные фильтры, TVS сборки и диодные системы защиты. Проведен ряд исследований частотных характеристик таких устройств. Однако сравнительный анализ устройств защиты РЭА от СКИ на основе элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами ранее выполнен не был. Цель данной работы – выполнить такой анализ.

Фильтры на пассивных элементах с сосредоточенными параметрами обладают рядом преимуществ, главными из которых являются надежность и долговечность. Однако паразитные параметры компонентов фильтра и монтажа существенно ограничивают рабочий диапазон частот. На рис. 1, *а* изображен помехоподавляющий фильтр на основе *RLC*-компонентов из [2]. Из частотных характеристик данного устройства можно сделать вывод о том, что высокочастотные составляющие СКИ могут пройти через фильтр без искажений. Ослабнут лишь низкочастотные составляющие в полосе заграждения. Межвитковые емкости дросселей будут шунтировать СКИ со входа на выход. Конденсаторы оказываются малоэффективными из-за наличия паразитной индуктивности выводов и контактных площадок.

Для улучшения помехоподавления применяют TVS сборки (варисторы), изображенные на рис. 1, *б*, или защитные диоды [3]. Однако наличие полупроводников накладывает ограничение на область применения. Ухудшаются надежность и долговечность. Наличие паразитных параметров, таких как индуктивность выводов, емкость *p–n*-перехода, а также диффузионной емкости, ограничивает быстродействие [4].



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Пассивный помехозащитный фильтр (*а*), варисторная защита (*б*), активный помехозащитный фильтр (*в*), микрополосковая ЛП с U-образными и штыревыми резонаторами (*г*)

Активные фильтры на основе операционных усилителей и транзисторов, изображенные на рис. 1, *в*, позволяют добиться максимально крутой амплитудно-частотной характеристики при малых габаритах [5]. Однако данный подход применим только к маломощным помехам, к которым СКИ не относится. Помимо этого, наличие *p–n*-переходов также снижает надежность, долговечность и быстродействие.

Перспективными устройствами защиты от СКИ являются фильтры на основе микрополосковых линий передач, изображенных на рис. 1, *г*. Главным преимуществом таких устройств являются простота реализации, надежность и безотказность [6, 7]. Однако из-за особенностей работы реализация низкочастотных фильтров крайне затруднительна. Низкочастотные составляющие СКИ способны преодолевать микрополосковые устройства защиты с минимальными потерями.

Рассмотренные решения обладают рядом недостатков, которые могут быть существенными для критичной РЭА. Анализируемые устройства не способны полностью подавить СКИ из-за широкого спектра. Конструктивные особенности существенно ограничивают быстродействие и область применения.

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. Жечев Е.С., Костелецкий В.П. Сильноточный помехозащитный фильтр для шины электропитания космического аппарата // 18-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика». – М.: МАИ, 2019. – С. 121–122.

3. Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р., Самотин И.Е. Модальный фильтр с TVS-сборкой для защиты сети FAST ETHERNET // Доклады ТУСУР. – 2010. – № 2. – С. 160–163.

4. Zhang S., Bao X., Lu R., Liu S., Zhang X., Liu Y. Characterization of parasitics from microwave scattering parameters of semiconductor laser diode // The 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology. doi:10.1109/mmwcst.2012.6238149

5. Zhang Z., Chen W., Bazzi A.M., Ramsay S., Czapor J., Aslanidis J. A new active EMI filter with virtual impedance enhancement. // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2018. DOI: 10.1109/apec.2018.8341351

6. Беляев Б.А., Довбыш И.А., Лексиков А.А., Тюрнев В.В. Частотно-селективные свойства микрополоскового фильтра на нерегулярных двухмодовых резонаторах // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 664–669.

7. Глушечко Э.Н. Особенности проектирования многорезонаторных микрополосковых направленных фильтров // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 2, № 15. – С. 42–43.

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 620.93

ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОДИОДНОЙ ИНДИКАЦИИ

Н.О. Студенков, В.О. Касьянов, А.В. Кислова, студенты
Научный руководитель С.П. Шкарупо
г. Томск, ТУСУР, каф. РЭТЭМ, studenkoff.play@yandex.ru

Предложена конструкция зарядной станции для осуществления зарядки электротранспорта, позволяющая производить зарядку переменным током.

Ключевые слова: электротранспорт, зарядка, зарядная станция, блок питания.

Существует необходимость в сетях зарядных станций для электромобилей. Связано это с тем, что рынок электромобилей динамично развивается. К 2020 г. в одной лишь Европе их общее число насчитывает несколько миллионов единиц.

Целью данной работы является разработка недорогой зарядной станции переменного тока с высокими показателями надежности.

Существующие стандарты. На данный момент наиболее распространены стандарты зарядки электромобилей:

1. J1772 – разработан американской организацией SAE в 2009 г. Представляет собой пятиштырьковый разъем. На данный момент используется в большей части электромобилей. Разъем предназначен для зарядки от сети переменного тока силой 32 А и под напряжением 220 В. Максимальная мощность составляет 7,2 кВт.

2. CHAdeMO – японский стандарт зарядки аккумулятора электромобиля. Мощность зарядки составляет от 62,5 кВт, что позволяет заряжать батарею до 80% емкости за полчаса. Рассчитан на максимальное напряжение 500 В и силу тока 125 А.

3. Combined Charging System (CCS) – стандарт, поддерживаемый крупнейшими европейскими и американскими производителями.

Разъем позволяет использовать переменный и постоянный ток зарядки согласно международному стандарту IEC 62196-2. Рассчитан на напряжение в 200–500 В при 200 А и мощности 100 кВт.

4. Mennekes Type 2 – европейский 7-контактный стандарт разъемов. Данный разъем разработан немецкой компанией Mennekes. Применяется в однофазных и трехфазных цепях. Максимальное напряжение 400 В, максимальная сила тока 63 А, мощность 43 кВт [5].

Зарядка. Решением данной проблемы является создание зарядной станции. В качестве разъема для разрабатываемой зарядной станции был выбран стандарт J1772 в связи с его распространенностью и небольшой стоимостью. Мощность зарядной станции находим по формуле

$$P = U \cdot I = 220 \text{ В} \cdot 16 \text{ А} = 3{,}5 \text{ кВТ},$$

где I – ток потребления электромобиля; U – рабочее напряжение зарядной станции.

В среднем емкость батареи электромобиля Nissan Leaf с пробегом равна 17,5 кВт·ч, таким образом, время полной зарядки находится по формуле

$$t = C/P = (17{,}5 \text{ кВт} \cdot \text{ ч}) / (3{,}5 \text{ кВт}) = 5 \text{ ч},$$

где C – емкость батареи электромобиля; P – мощность зарядной станции.

Ниже представлены схема зарядной станции, принцип работы (рис. 1, 2) и характеристики (таблица).

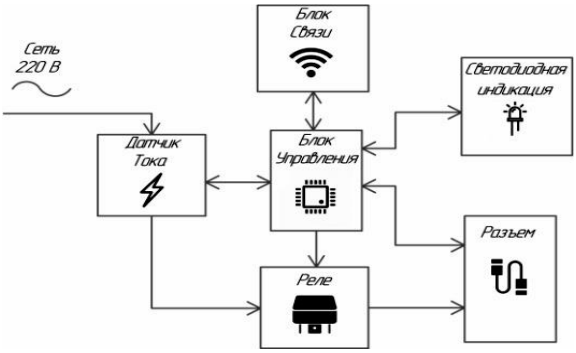


Рис. 1. Структурная схема предложенной зарядной станции

Питание зарядной станции осуществляется через бытовую розетку. Переменное напряжение поступает на датчик тока. Сигнал о необходимом напряжении и мощности поступает к блоку управления, который в свою очередь осуществляет управление светодиодной инди-

кацией. Необходимая информация передается на сервер через блок связи. Коммутация внешней силовой цепи осуществляется через реле.

Светодиодная индикация отображает состояние зарядной станции. Существует три состояния, в зависимости от которых происходит изменение цвета светодиодов.

1. Фиолетовый цвет – станция работает, можно производить зарядку, но отсутствует связь с сервером.

2. Синий цвет – станция работает, можно производить зарядку, связь с сервером установлена.

3. Зеленый цвет – станция работает, осуществляется зарядка [3].

Характеристики зарядной станции

Параметр	Значение
Мощность	До 6 кВт
Разъем	J1772 (Type 2)
Время полной зарядки	5–8 ч
Сетевое напряжение	Переменное, 220 В

Рис. 2. Полностью собранная и рабочая зарядная станция

Основные отличия разработанной станции

1. Низкая себестоимость в сравнении с аналогами.

2. Большой спектр возможностей, в том числе наличие связи с Интернетом и возможности раздачи Wi-Fi сети;

3. Наличие собственного сервера для осуществления технической поддержки и возможности ведения статистики зарядки;

4. Высокая стойкость к внешним воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Источники питания и стабилизаторы. – М.: Радиохобби, 2002. – 150 с.

2. Кольтюков Н.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств: учеб. пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 84 с.

3. Студенков Н.О., Касьянов В.О., Шкарупо С.П., Зарядная станция для электротранспорта переменного тока // Матер. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 20–22 ноября 2019 г.– Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 211–213.

4. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. – М.: СОЛОН-ПЕРСС, 2008. – 448 с.

5. Заряжаем электромобиль – основные типы зарядных станций и разъемов зарядных устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://hevcars.com.ua/reviews/zaryazhaem-elektromobil-osnovnyie-tipy-zaryadnyih-stantsiy-i-razemov/ (дата обращения: 01.03.2020).

УДК 521.315.82.2

ЕМКОСТНОЕ И РЕЗИСТИВНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

А.А. Климов, Т.Д. Токмашев, студенты каф. ЭП

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, priplushed@gmail.com

Проводится сравнение методики резистивного профилирования полупроводниковых гетероструктур на основе измерений вольтрезистивных характеристик с емкостным профилированием в применении к светодиодам с квантовыми ямами. Показано, что резистивный метод обладает более высокой информативностью, но более сложен в интерпретации результатов.

Ключевые слова: резистивное профилирование, емкостное профилирование, квантовые ямы, гетероструктуры.

В настоящее время широкое применение получили светоизлучающие гетероструктуры (ГС) с множественными квантовыми ямами (КЯ). Это требует развития методов их анализа, в частности, выявления квантовых ям и исследования их свойств. Особое внимание уделяется методу профилирования концентрации свободных носителей заряда. Однако емкостные методы ограничены по предоставляемой информации из-за высокой частоты тестового сигнала (порядка 100 кГц). Как результат, в них не фиксируются медленные процессы, связанные со структурной перестройкой межфазных границ, перезарядкой медленных состояний и т.д.

В работе [1] предложено использовать вольт-резистивную характеристику (ВРХ) импеданса ГС с КЯ ввиду того, что эти измерения проводятся на низкой частоте (менее 1 кГц), потому они чувствительны как к быстрым, так и медленным процессам.

Целью данной работы является сравнение метрологических возможностей емкостного и резистивного профилирования ГС.

Емкостное профилирование. Известны методики определения параметров диффузионных *p–n*-переходов по их ВФХ [1, 2], в частности, высоты барьера, концентрации легирующей примеси, а также профиля концентрации в области пространственного заряда (ОПЗ) – $N(x)$. В случае емкостного профилирования профиль концентрации находят с помощью выражения, которое в общепринятых обозначениях имеет вид

$$N_d(x) = 2 \Big/ \left[q\varepsilon_S \varepsilon_0 S^2 \frac{d}{dV}\left(C_{p-n}^{-2}(V)\right)\right]. \qquad (1)$$

Отыскание профиля концентрации свободных носителей в ГС с КЯ проводят по выражению (1), однако её эквивалентная емкость включает в себя емкость *p–n*-перехода и ёмкости КЯ [1]:

$$n_{\text{ГС}}^{(\text{C})}(x) = \frac{N_d \left[1 + \sum_{j=1}^{m} \left(C_j^{(\text{кя})}(V) \big/ C_{p-n}(V) \right) \right]^3}{1 - \dfrac{2C_{\max}^{(\text{кя})}}{C_{p-n}(V)} \cdot \dfrac{q(\varphi_б + V)}{kT} \sum\limits_{j=1}^{m} \left\{ \left(1 + \dfrac{W(V) - x_j^{(\text{кя})}}{W(V)} \right) \cdot Z \right\}}.$$

Здесь $Z = \sum\limits_{k=1}^{N} \left[f_{kj}^{(\text{кя})}(V) \cdot \left(1 - f_{kj}^{(\text{кя})}(V) \right) \right]$; $C_{\max}^{(\text{кя})}$ – предельная емкость КЯ, W – ширина ОПЗ. Остальные обозначения общепринятые. Видно, что в профиле концентрации носителей заряда в ГС с КЯ предсказывается наличие максимумов, вызванных перезарядкой КЯ. Их появление описывает произведение функций Ферми для электронов и дырок: $f_{kj}^{(\text{кя})} \cdot (1 - f_{kj}^{(\text{кя})})$.

Резистивное профилирование. В работе [1] предложен метод резистивного профилирования. Для диффузионного *p–n*-перехода профиль концентрации может быть найден из зависимости эквивалентного сопротивления замещения от напряжения смещения:

$$R_{p\text{-}n}(V) \cong \frac{kT}{q^2 S} \frac{N_d(V)}{n_i^2} \sqrt{\frac{\tau_p}{D_p}} \cdot \exp\left(-\frac{qV}{kT} \right). \qquad (2)$$

Согласно методике профилирования профиль концентрации $N(V)$ в *p–n*-переходе можно найти при пошаговом изменении напряжения и измерении приращений проводимости ГС. Тогда из (2) найдем профиль концентрации электронов экспериментальной ВРХ $R_{p\text{-}n}^{(ex)}(V)$

$$N(V)=\frac{q^2 n_i}{kT}\,Sn_i\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\cdot\left[\frac{d}{dV}\left(R_{p\text{-}n}^{(ex)}(V)\right)+\frac{q}{kT}\left(R_{p\text{-}n}^{(ex)}(V)\right)\right]\cdot\exp\left(\frac{qV}{kT}\right). \quad (3)$$

В применении к ГС с КЯ выражение для нахождения профиля концентрации электронов методом резистивного профилирования в стандартных обозначениях имеет вид

$$n_{\text{ГС}}^{(R)}(x)\cong\frac{n_i^2}{N_d}\cdot\frac{q}{kT}\cdot\left\{1+A\cdot\sum_{j=1}^{m}\left[\left(1+\frac{W(V)-x_j^{(\text{кя})}}{W(V)}\right)\cdot Z\right]\right\}.$$

Здесь A – константа материала КЯ. Данное выражение показывает, что, как и при емкостном методе, при резистивном профилировании на зависимости концентрации носителей заряда от координаты имеются максимумы концентрации, описываемые произведением функций Ферми для электронов и для дырок. Физически они могут быть вызваны только изменением концентрации носителей заряда, т.к. другие величины, входящие в дифференциальное сопротивление КЯ, от напряжения смещения не зависят. Величины максимумов зависят от параметров КЯ, входящих в параметр *A*, а также от её координаты и напряжения смещения.

Выводы по работе. Таким образом, оба метода профилирования одинаково способны выявить наличие КЯ по экспериментально измеренным ВФХ или ВРХ. Однако между ними имеются различия, которые связаны, во-первых, с технической реализацией метода – емкостное профилирование проще в техническом исполнении, тогда как резистивное требует дополнительные фазовые измерения, что сложно. Во-вторых, результаты экспериментальных исследований по методу емкостного профилирования ввиду высокочастотности измерений, как правило, не содержат сложных зависимостей, достаточно регулярны, потому просты в трактовке. Измерения дифференциального сопротивления на низкой частоте более сложные в плане принимаемого сигнала, содержат нерегулярные составляющие, потому их физическая интерпретация весьма сложная. Последнее обстоятельство является следствием преимущества резистивного метода, т.к. дифференциальное сопротивление зависит от процессов структурной пере-

стройки, перезарядки медленных состояний и потому содержит больше информации, чем зависимость ёмкости по причине регистрации всех электрических процессов в ГС с их длительностью $\tau_{\text{пр}} \ll T_C$, т.е. меньшей периода тестового сигнал T_C, который для ВРХ имеет величину до единиц миллисекунд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В.Н., Солдаткин В.С., Каранкевич О.А. Резистивное профилирование как метод исследования гетероструктур с множественными квантовыми ямами // Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 398–399.
2. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмитанса ООО «Техномедиа». – СПб.: Элмор, 2007. – 220 с.
3. Давыдов В.Н., Новиков Д.А. Эквивалентная схема гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 102–109.
4. Давыдов В.Н. Определение элементов эквивалентной схемы гетероструктур с множественными квантовыми ямами. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 127–133.

УДК 521.315.82.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ЕМКОСТНОГО И РЕЗИСТИВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

А.А. Климов, Т.Д. Токмашев, студенты каф. ЭП

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, ygt.art@gmail.com

Приводятся результаты экспериментального сопоставления двух методик профилирования светоизлучающих гетероструктур: резистивного и емкостного, на основе измеренных вольт-резистивных и вольт-фарадных характеристик. Приведены практически измеренные профили гетероструктур, а также их анализ. Показано, что резистивный метод не уступает по информативности емкостному.

Ключевые слова: резистивное профилирование, емкостное профилирование, квантовые ямы, гетероструктуры.

На данный момент среди электрофизических методов для исследования свойств гетероструктур, а также построения профилей легирования используются методы емкостных измерений [1]. Данные методы обладают своими достоинствами и недостатками. Ёмкостные методы проще в техническом исполнении, однако ограничены по предоставляемой информации из-за высокой частоты тестового сиг-

нала (порядка 100 кГц). Как результат, в них не фиксируются медленные процессы, связанные со структурной перестройкой межфазных границ, перезарядкой медленных состояний и т.д.

В работе [2] описан метод использования вольт-резистивной характеристики (ВРХ) импеданса ГС с КЯ для построения профилей легирования в ГС. Преимуществом данного метода является то, что измерения проводятся на низкой частоте (менее 1 кГц), и потому они чувствительны как к быстрым, так и медленным процессам.

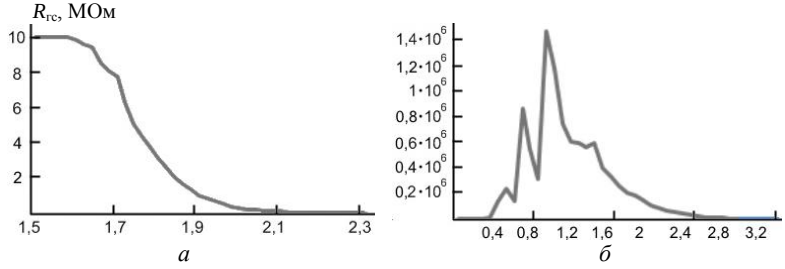
Целью данной работы является экспериментальное сравнение профилей легирования ГС, найденных из вольт-фарадной характеристики (ВФХ) и ВРХ, а также их сравнение.

Постановка эксперимента. В качестве экспериментального образца использовалась светоизлучающая гетероструктура InGaN/GaN. ВФХ и ВРХ снимались на измерителе импеданса E7-20, в области прямых смещений с шагом 20 мВ на частотах тестового сигнала 100 кГц амплитудой 40 мВ и 1 кГц соответственно.

Измерения проводились для нескольких образцов, все полученные зависимости имеют сходный характер. В качестве результата приведены зависимости самого показательного образца.

Результаты эксперимента и их анализ. При снятии ВРХ в диапазоне 0~1,5 В сопротивление непредсказуемо менялось в пределах от десятков Ом до МОм, следовательно, эта область не является показательной и не анализировалась.

На рис. 1, *а* представлена ВФХ образца, а на рис. 1, *б* – графический дифференциал зависимости $1/C^2(V)$, которая пропорциональна профилю концентрации примеси. На рис. 2, *а* и *б* приведены ВРХ образца и графический дифференциал ВРХ соответственно.



а *б*

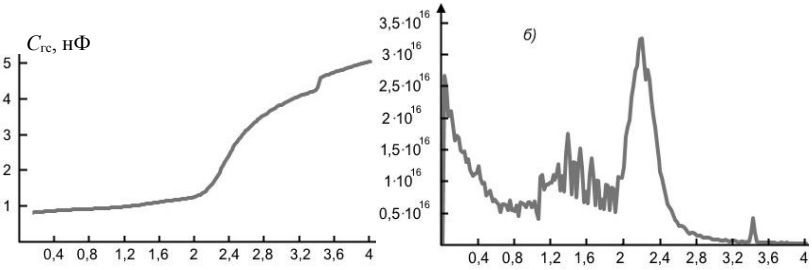
Рис. 1. ВРХ образца (*а*); графический дифференциал ВРХ (*б*)

Как видно из представленных графиков:

• область резкого падения сопротивления смещена относительно области резкого роста емкости, это связано, вероятно, с различием тестовых частот для ВРХ и ВФХ (1 кГц и 1 МГц);

• на ВФХ и ВОХ образца имеются области изменения угла наклона зависимости, которые отображаются пиками на графических дифференциалах $d(1/C^2)/dU$ и dR/dU;

• последний пик на зависимости $d(1/C^2)/dU$ образца связан со скачкообразным изменением емкости, что скорее всего вызвано автоматическим изменением предела измерения прибора.



а *б*

Рис. 2. ВФХ образца (*а*); графический дифференциал $1/C^2(V)$ (*б*)

Вывод. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что информативность метода резистивного профилирования не уступает методу емкостного профилирования (о чем свидетельствует наличие одного ярко выраженного пика в обоих случаях), а также, согласно теории, обладает большим потенциалом в связи с большей чувствительностью к медленно протекающим процессам из-за проведения измерений на низкой частоте.

В дальнейшем планируется повторение эксперимента с использованием лучшего оборудования, чтобы иметь возможность анализировать ВРХ в диапазоне низких смещений (0–1,5 В).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмитанса ООО «Техномедиа». – СПб.: Элмор, 2007. – 220 с.

2. Давыдов В.Н., Солдаткин В.С., Каранкевич О.А. Резистивное профилирование как метод исследования гетероструктур с множественными квантовыми ямами // Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 398–399.

3. Давыдов В.Н., Новиков Д.А. Эквивалентная схема гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 102–109.

4. Давыдов В.Н. Определение элементов эквивалентной схемы гетероструктур с множественными квантовыми ямами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 127–133.

УДК 521.315.82.2

ПРОФИЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ С *p–n*-ПЕРЕХОДОМ

Т.Д. Токмашев, А.А. Климов, студенты каф. ЭП
Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, priplushed@gmail.com

Приводится расчет зависимости времени жизни носителей заряда в диодной структуре от напряжения смещения (координаты в области пространственного заряда), показывающий принципиальную возможность профилирования указанного параметра подобно емкостному и резистивному профилированию концентрации свободных носителей заряда. Прогнозируется, что предложенная методика профилирования будет востребована в разработках приборов наноэлектроники, основанных на явлениях в гетероструктурах, содержащих квантовые ямы.

Ключевые слова: гетероструктуры, квантовые ямы, время жизни носителей заряда.

В настоящее время эксплуатационные параметры большого числа приборов опто- и наноэлектроники в значительной степени зависят от значения времени жизни свободных носителей заряда, находящихся в неравновесном состоянии в активной области прибора. Поэтому управление данным параметром необходимо для контроля качества разрабатываемого прибора, стабильности его характеристик и оценки деградационных свойств [1].

Существующие методы измерения времени жизни в электронных приборах преимущественно основаны на измерении времени распада неравновесного состояния электронно-дырочной системы, созданного импульсным воздействием. К таковым методам можно отнести измерение спада фотопроводимости или фотоЭДС, а также метод нестационарной спектроскопии глубоких уровней в различных модификациях [2].

Однако указанные выше методы позволяют измерять время жизни, усреднённое по площади измерения, и только вблизи поверхности полупроводникового образца.

Измерить же время жизни в глубине образца, как и распределение по толщине активной области полупроводникового прибора, этими методами невозможно. Авторам неизвестны методы измерения кинетических параметров твердотельных структур и приборов опто- и наноэлектроники, способные выполнять указанные измерения.

В данной работе предложен неразрушающий метод, основанный на профилировании времени жизни неравновесных носителей заряда

в полупроводниковом приборе, содержащем *p*–*n*-переход, как в классическом (диффузионном) исполнении, так и переход в виде протяжённой области, изготовленной из высокоомного материала с инжектирующими контактами на её торцах и содержащей множественные квантовые ямы.

Методология профилирования. Рассматривается *p*–*n*-переход, образованный контактом двух материалов с различным типом проводимости или же изготовленный из высокоомного материала с низкоомными областями противоположного типа проводимости на его торцах. Пусть также к торцам рассматриваемого образца подключены электроды батареи, обеспечивающей возможность управлять прикладываемым напряжением V как в прямом направлении, так и обратном. Обратный ток I_0 такой структуры в общепринятых обозначениях будет определяться током неосновных носителей заряда из *p*- и *n*-областей [1]:

$$I_0 = qS \cdot \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot \frac{n_i}{N_d} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot \frac{n_i}{N_a} \right). \qquad (1)$$

Тогда дифференциальная проводимость перехода в области прямых смещений ($V > 0$) будет иметь вид

$$G_g = \frac{q^2 n_i}{kT} \cdot S \cdot \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot \frac{n_i}{N_d} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot \frac{n_i}{N_a} \right) \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) = G_g^0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT} \right). \qquad (2)$$

Дифференциальное сопротивление находится как величина, обратная дифференциальной проводимости: $R_g(V) = 1/G_g(V)$. Времена жизни для электронов и дырок равны: $\tau_n = \tau_p$. Тогда из (2) найдём:

$$\tau_n = \left[\frac{q^2 n_i}{kT} \cdot S \cdot \left(\sqrt{D_p} \cdot \frac{n_i}{N_d} + \sqrt{D_n} \cdot \frac{n_i}{N_a} \right) \cdot R_g(V) \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT} \right) \right]^2. \qquad (3)$$

Выражение (3) следует понимать так, что если экспериментально измерена зависимость дифференциального сопротивления *p*–*n*-перехода в области прямых смещений $R_g(V) = R_g^{(\mathrm{ex})}(V)$, то время жизни носителей заряда можно вычислить по выражению (3). Используя этот результат, из выражения (3) можно вычислить профиль времени жизни $\tau_{\text{проф}}$, определив его как малые приращения времени жизни, достигаемые при пошаговом увеличением напряжения смещения на величину ΔV

$$\tau_{\text{проф}}(V)=\frac{\Delta\tau_n}{\Delta V}=2\left[\frac{q^2 n_i}{kT}\cdot S\left(\sqrt{D_p}\cdot\frac{n_i}{N_d}+\sqrt{D_n}\cdot\frac{n_i}{N_a}\right)\cdot R_g(V)\cdot\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right]\times$$

$$\times\left[\frac{q^2 n_i}{kT}\cdot S\left(\sqrt{D_p}\cdot\frac{n_i}{N_d}+\sqrt{D_n}\cdot\frac{n_i}{N_a}\right)\right]\cdot\left[\frac{dR_g}{dV}+\frac{qR_g}{kT}\right]\cdot\exp\left(\frac{qV}{kT}\right). \qquad (4)$$

Преобразовав это выражение, запишем его в более удобной для дальнейшего анализа форме

$$\tau_{\text{проф}}(V)=2\cdot\left[\frac{q^2 n_i}{kT}\cdot S\cdot\left(\sqrt{D_p}\cdot\frac{n_i}{N_d}+\sqrt{D_n}\cdot\frac{n_i}{N_a}\right)\cdot\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right]^2\times$$

$$\times R_g^{(\text{ex})}(V)\cdot\left[\frac{dR_g^{(\text{ex})}(V)}{dV}+\frac{qR_g^{(\text{ex})}(V)}{kT}\right]. \qquad (5)$$

В компактной форме это выражение примет вид

$$\frac{\tau_{\text{проф}}^{(+)}(V)}{\tau_n}=\frac{2}{R_g^{(\text{ex})}(V)}\cdot\left[\frac{dR_g^{(\text{ex})}(V)}{dV}+\frac{qR_g^{(\text{ex})}(V)}{kT}\right]. \qquad (6)$$

Данное выражение позволяет рассчитать профиль времени жизни носителей заряда, используя экспериментально измеренную зависимость $R_g^{(\text{ex})}(V)$, если напряжение смещения соответствует прямому смещению. Это отмечено верхним индексом (+) в числителе левой части. В случае обратных смещений это выражение несколько упрощается и принимает вид

$$\frac{\tau_{\text{проф}}^{(-)}(V)}{\tau_n}=\frac{2}{R_g^{(\text{ex})}(V)}\cdot\frac{dR_g^{(\text{ex})}(V)}{dV}. \qquad (7)$$

Знак (–) в верхнем индексе отыскиваемого профиля указывает на то, что выражение (7) справедливо в области отрицательных (обратных) смещений. Заметим, что размерность получаемых по выражениям (6) и (7) результатов – обратные вольты соответствует размерности профилирования безразмерной величины, что связано с вычислением времени жизни в единичном интервале напряжений смещения. Для получения численных значений времени жизни в конкретной точке *p*–*n*-перехода необходимо найти время жизни носителей τ_n из выражения для обратного тока, величина которого находится экспериментальным путём. Далее перевод зависимости (6), (7) от напряжения смещения в зависимость от координаты z вдоль направления роста

p–n-перехода производится вычислением толщины перехода W из вольт-фарадной характеристики перехода $C(V)$ и отождествлением координаты и толщины: $z = W = C(V)/S\varepsilon_s\varepsilon_0$.

Выводы по работе. Таким образом, на основании рассмотрения зависимости дифференциального сопротивления *p–n*-перехода от напряжения смещения предложена методика измерения профиля времени жизни неравновесных носителей заряда в *p–n*-переходе как в области прямых, так и обратных смещений. На основании классических представлений о формировании токов в 3D-структурах получены аналитические выражения для вычисления профиля. Поскольку данная зависимость может быть измерена на низких частотах тестового сигнала, то данный метод должен быть чувствительным к структурным нарушениям и примесям в области пространственного заряда и может стать основным методом выявления несовершенств структуры полупроводника, особенно при наличии квантовых ям и (или) квантовых точек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.; пер. с анг. под ред. Р.А. Суриса. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

2. Мамадалимов А.Т., Лебедев А.А., Астрова Е.В. Спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. – Ташкент: Университет, 1999. – 164 с.

УДК 62-1/-9

УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРИПАЙКИ ДРАЙВЕРА ПИТАНИЯ К СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЕ С ЦОКОЛЕМ Е27

Н.О. Студенков, В.О. Касьянов, А.И. Окуневский, Б.Д. Зейнадилова, студенты каф. РЭТЭМ

Научный руководитель С.П. Шкарупо

г. Томск, ТУСУР, k.vladislav0811@outlook.com

Предложена конструкция аппарата для осуществления припайки источника питания к светодиодной лампе.

Ключевые слова: автоматика, светодиодная лампа, драйвер, пайка.

Существует необходимость в роботизированных устройствах, позволяющих автоматизировать процесс производства. Данные устройства позволят сэкономить ресурсы предприятия, выполнить сложную и тонкую работу, а также сократить время производства изделия. Одним из таких изделий является светодиодная лампа. Существует необходимость в точной и качественной припайке драйверов к светодиодной лампе.

Решением данной проблемы является разработка аппарата автоматической припайки источников питания к светодиодной лампе. Благодаря своим возможностям данное устройство высоко ценится на рынке, однако аналоги данного станка найти практически невозможно.

Автоматическая пайка. Источник питания, или драйвер, – неотъемлемая часть любого светодиодного осветительного устройства. Грамотный выбор светодиода позволяет улучшить характеристики лампы, однако такие параметры, как срок службы, стабильность и колебания светового потока, определяются не светодиодами. За них отвечает драйвер, поэтому для него очень важно обеспечить хорошую стабилизацию по току и качественный монтаж драйвера на лампу [3, 5].

Пайка – процесс создания неразъемного соединения материалов, находящихся в твердом состоянии, путем введения расплавленного припоя к месту соприкосновения материалов при температуре ниже температуры плавления соединяемых материалов и дальнейшего затвердевания расплава. Качество соединения зависит от таких процессов, как оплавление припоя, смачивание, растекание, растворение, диффузия и кристаллизация.

Что касается автоматической пайки, то её основным достоинством является полная автоматизация процесса монтажа электронных устройств, которая позволяет достичь высокой надежности и отличного качества паяных соединений.

В разрабатываемом устройстве на пайку источника питания одной лампочки будет уходить от 7 до 10 с.

Принцип работы устройства. Механические движения осуществляются 7-шаговыми двигателями типа Nema 17. Двигатели выполняют основные функции аппарата, среди которых позиционирование LED лампочки непосредственно перед пайкой, перемещение рабочих узлов механизма припайки вдоль осей, подача связующего вещества припоя и флюса. Управление двигателями происходит за счет ШИМ-сигнала, исходящего от микроконтроллера ATmega 2560 по предварительной настройке управляющей программы (рис. 1, 2).

Процесс выполнения работ в предлагаемом аппарате можно описать кратко, разделив всю работу на несколько этапов:

I этап – подготовка заготовки к пайке. Этот этап выполняется оператором. Источник питания, заранее установленный на лампочку, помещается в специальный разъем.

II этап – инициализация параметров. Возвращение в начальную точку рабочих узлов, выставление рабочей высоты установки. Все манипуляции происходят в автоматическом режиме, работа аппарата исходит от управляющей программы.

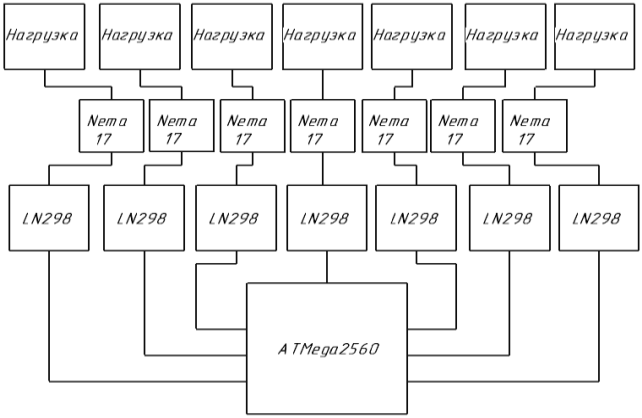


Рис. 1. Блок схема подключения рабочих узлов к микроконтроллеру

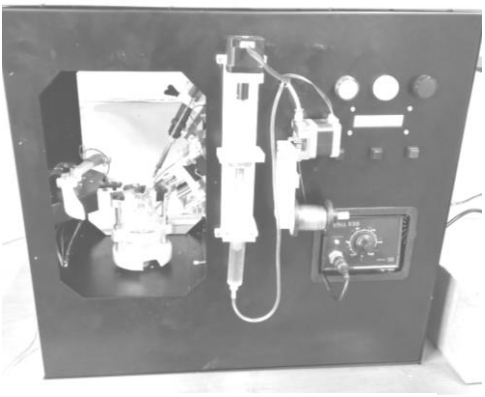


Рис. 2. Собранный прототип аппарата

III этап – монтаж источника питания к светодиодной лампе. Выполняется независимо от оператора. Сперва происходит удаление лишних выводов пневматическими бокорезами. Необходимый сжатый воздух подается через 2 клапана, один из них запирающий, другой открывающий. Одновременно с этим происходит подача дозированного количества флюса к месту пайки. Далее идёт установка жала паяльника к месту пайки выводов лампочки к источнику питания. Вместе с этим идет автоматическая подача припоя. Данный этап выполняется дважды на одном изделии.

IV этап – проверка работоспособности лампы. Заключительный этап выполняется токовыми клещами, которые осуществляют кон-

троль качества изготовленного изделия. Каждый этап работы отображается на установленном LCD-дисплее.

Особенности разработанного устройства

1. Низкая себестоимость и практически полное отсутствие аналогов на рынке.

2. Скорость пайки до 7–10 с.

3. Высокая стойкость к термальным воздействиям, физическим воздействиям и воздействиям влаги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шустов М.А. Практическая схемотехника. Источники питания и стабилизаторы // Радиохобби. – 2002. – 150 с.

2. Кольтюков Н.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств : учеб. пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 84 с.

3. Что такое светодиодная лампа? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ledjournal.info/vopros-otvet/chto-takoe-svetodiodnaja-lampa.html

4. Туев В.И. Проектирование светодиодных и светотехнических устройств: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2018. – 55 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/7937

5. Туев В.И. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: учеб. пособие / В.И. Туев, А.А. Вилисов, В.С. Солдаткин. – Томск: ТУСУР, 2016. – 33 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://edu.tusur.ru/publications/5953

УДК 621.315.592.

IT-СПОСОБ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХПОЛЮСНИКА

Д.В. Соколов, В.А. Пахоруков, студенты НИ ТГУ

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, rawen_20@mail.ru

Определены характеристики двухполюсника и методика их измерения. Методика подобрана в соответствии с требуемой точностью измерений, а также необходимостью достижения требуемого частотно-динамического диапазона. Предложены принципиальная блок-схема устройства и методика проведения измерений.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс, полупроводниковые приборы, мостовой метод, измерение фазы, фотопроводимость.

В настоящее время существует множество устройств для измерения свойств двухполюсников, работающих на различных методиках. Многие из них либо не позволяют управлять процессом через персо-

нальный компьютер (PC), либо дорогостоящи и обладают ограниченным функционалом. Это вынуждает исследователей самим искать способы измерений [1, 2], в частности, разрабатывать собственные устройства и методики с использованием автоматизации.

В измерительной зарубежной технике часто используют графическую среду разработки приложений LabView и LavView NXG [3] от фирмы National Instruments или другие стандарты производителей измерительной аппаратуры. У подобных приборов есть свои недостатки: не имеют удобной, актуальной программной поддержки (если имеют), плохо поддаются ремонту, сложны в освоении, и зачастую такие приборы дорогостоящи.

Целью данной работы является выбор оптимального современного метода измерения параметров полупроводниковых приборов, а также разработка автоматизированного комплекса для его реализации с использованием современной компонентной базы с учётом соотношения оптимальности параметров к стоимости компонентов, а также с возможностью отображения результатов, их вывода в отдельный файл, построения графиков.

Метод измерения емкости полупроводниковой структуры. Исходя из работы [4], диапазон измерения ёмкости у мостового метода имеет большую ширину, а точность превосходит прочие методы. Мостовой метод достаточно распространён и часто применяется в измерительной технике (например, в измерительной технике компании Agilent Technologies). Он может быть применен для измерения полупроводниковой емкости *C*. Это делает его предпочтительным для предлагаемого устройства.

Структура комплекса и методика измерения. Создаваемый автоматизированный комплекс предназначен для измерения ёмкости и амплитудно-фазовых характеристик двухполюсника.

Конструктивно можно представить устройство как блочную схему, в которой можно выделить следующие блоки: цифровой, аналоговый блоки, конвертер «USB – COM-Port(RS232)», блок питания.

Блочная структура комплекса показана на рис. 1. Аналоговый блок представляет собой печатную плату, на которой собраны резистивный балансный мост, делитель напряжения, генератор и инструментальный усилитель.

Цифровой блок собран на базе микропроцессора ADuC812 [5]. Микропроцессор принимает команды с центрального процессора – PC (персональный компьютер (англ. Personal computer)) и управляет работой двух мультиплексированных 8-разрядных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) (АЦП max153 [6] с частотой оцифровки от

10 Гц до 1 МГц) и генератора тестового сигнала. С генератора подается тестовый сигнал с амплитудой 0,7 В на АЦП-Т и на мостовую схему через делитель D (коэффициент деления 1:35) с амплитудой 20 мВ. С цифроаналогового преобразователя (ЦАП-S), встроенного в микропроцессор, подается напряжение на мостовую схему через усилитель мощности. Тестовый сигнал проходит через двухполюсник и изменяется, неся информацию о нем, попадает на инструментальный усилитель и считывается АЦП-S. Затем передается через буферную память и микропроцессор в PC. Для связи микропроцессора ADuC812 с центральным процессором используется конвертер «USB 2.0 – RS232». Поступая на PC, программа строит график зависимости амплитуды от времени, аппроксимирует его и вычисляет разность фаз ($\Delta\varphi$). Для восстановления синусоиды по результатам измерений предполагается проводить 10 измерений на период при количестве периодов $100 \div 1000$.

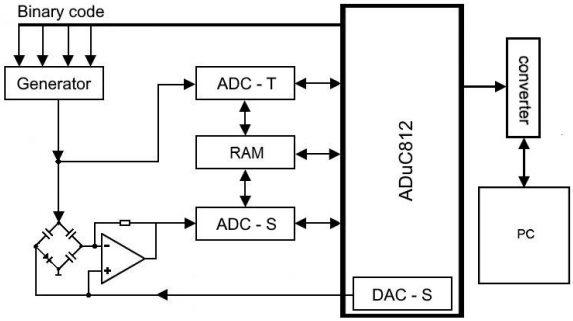


Рис. 1. Блочная структура автоматизированного комплекса

Для написания программы предлагаются следующие языки программирования: Python и Qt. Достоинством обоих языков является бесплатное распространение, возможность использовать графическую оболочку, наличие и возможность подключения библиотек для широкого количества задач. Оба хоть и выпущены в 90-х, но сохраняют актуальность и техническую поддержку от производителя.

Вывод. Предложена структурная схема программного комплекса для измерения электрофизических характеристик двухполюсников, в котором амплитудные и фазовые измерения выполнены с использованием высокоскоростных АЦП с записью результатов измерений в быструю память. Последующая обработка полученных цифровых массивов позволяет определить амплитудные и фазовые изменения в

сигнале двухполюсника, из которых строятся вольт-фарадная и вольт-сименсная характеристики исследуемого двухполюсника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляков А.В., Перов М.Ю. Программный комплекс для исследования статистических характеристик шумовых процессов // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер.: Радиофизика. – 2004. – Вып. 2. – С. 143–153.

2. Костюков С.А. Измерительный комплекс спектроскопии низкочастотных шумов полупроводниковых диодных структур / С.А. Костюков, А.В. Ермачихин, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, Н.Б. Рыбин // Измерительная техника. – 2013. – № 9. – С. 61–64.

3. Тревис Д. LabView для всех. – М.: ДМК; ПриборКомплект, 2004. – 537 с.

4. Давыдов В.Н. Измерительные методики и автоматизированный комплекс для исследования приборов опто- и наноэлектроники / В.Н. Давыдов, Д.А. Новиков // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 1(35). – С. 64–74.

5. Electronic Components Datasheet Search [Электронный ресурс]. – Режим доступа:https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/48885/AD/ADUC812.html (дата обращения: 15.03.2020).

6. Electronic Components Datasheet Search [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/72834/MAXIM/MAX153.html (дата обращения: 15.03.2020).

УДК 621.382.2

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Т.Д. Токмашев, студент каф. ЭП

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, priplushed@gmail.com

Составлена эквивалентная схема гетероструктуры (ГС) с квантовыми ямами (КЯ), учитывающая емкость и сопротивление барьерного слоя, емкость и сопротивление релаксации заряда в квантовой яме, сопротивлений поставки в квантовые ямы и сопротивление пролета КЯ. Рассчитаны аналитические выражения для элементов схемы замещения.

Ключевые слова: резистивное профилирование, емкостное профилирование, квантовые ямы, гетероструктуры.

В настоящее время изучение свойств полупроводниковых структур нередко осуществляется посредством представления структуры в виде *RC*-цепи. Данный способ исследования получил название метода эквивалентной схемы (ЭС). Преимуществом метода ЭС является простота анализа сложных процессов, протекающих в полупроводнике, в частности, с помощью метода ЭС были исследованы свойства гетеро-

структур «металл–диэлектрик–полупроводник» [1]. В работе [2] была составлена ЭС гетероструктуры с КЯ. Однако в данной работе сквозной ток (ток, не участвующий в заполнении КЯ) был положен пренебрежимо малым (предполагалось, что весь ток, текущий через ГС, попадает в КЯ), а также не учитывалась эмиссия носителей заряда из КЯ.

Целью данной работы является составление ЭС гетероструктуры с КЯ, учитывающей как инжекцию свободных носителей заряда в КЯ, так и сквозной ток через гетероструктуру.

Расчет эквивалентных параметров. В качестве схемы замещения была выбрана последовательная *RC*-цепь, так как значения её элементов легко определить, сняв с образца полевые и частотные зависимости $C_{\text{гс}}(\omega,V)$ и $R_{\text{гс}}(\omega,V)$. В свою очередь, параметры КЯ и барьерного слоя ГС можно получить, связав их с полученными зависимостями. На рис. 1 представлена схема обратного преобразования ЭС из последовательно-параллельной (соответствующей физической модели ГС, рис. 1, *а*) в последовательную (соответствующую получаемым зависимостям, рис. 1, *д*).

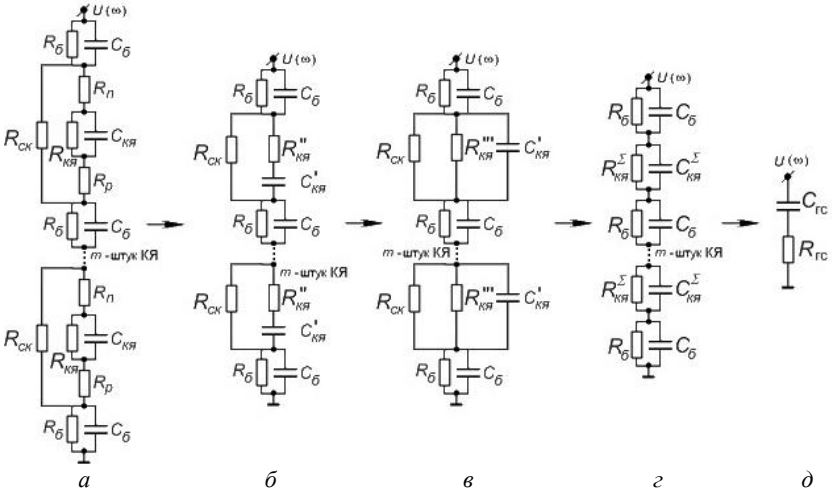


Рис. 1. Схема преобразования последовательно-параллельной ЭС гетероструктуры в последовательную

Для того чтобы преобразовать исходную ЭС, необходимо выполнить преобразование параллельно соединенных $C_{\text{кя}}$ и $R_{\text{кя}}$

для каждой из m квантовых ям в последовательные $C'_{\text{кя}}$ и $R'_{\text{кя}}$ (переход *а–б*):

$$C'_{\text{кя}} = C_{\text{кя}} \frac{1+\omega^2\tau_{\text{кя}}^2}{\omega^2\tau_{\text{кя}}^2}, \quad R'_{\text{кя}} = R_{\text{кя}} \frac{1}{1+\omega^2\tau_{\text{кя}}^2}, \tag{1}$$

где $\tau_{\text{кя}} = C_{\text{кя}} \cdot R_{\text{кя}}$. Далее заменим полученные сопротивления $R'_{\text{кя}}$, R_n и R_p на одно сопротивление $R''_{\text{кя}}$:

$$R''_{\text{кя}} = R''_{\text{кя}} + (R_n + R_p). \tag{2}$$

На втором шаге преобразования ЭС (переход *б–в*) преобразуем последовательно соединенные $R''_{\text{кя}}$ и $C'_{\text{кя}}$ в параллельные $R'''_{\text{кя}}$ и $C'''_{\text{кя}}$:

$$C''_{\text{кя}} = C'_{\text{кя}} \frac{1}{1+\omega^2\tau'^2_{\text{кя}}}, \quad R'''_{\text{кя}} = R''_{\text{кя}}(1+\omega^2\tau''^2_{\text{кя}})/\omega^2\tau''^2_{\text{кя}}. \tag{3}$$

Заметим, что ввиду использованных замещений возникает необходимость перерасчета времени жизни $\tau''^2_{\text{кя}} = C'_{\text{кя}} \cdot R''^2_{\text{кя}}$.

Таким образом, сопротивления $R'''_{\text{кя}}$ и $R_{\text{ск}}$ оказываются параллельно соединенными, что позволяет заменить их одним сопротивлением $R^{\Sigma}_{\text{кя}}$ (шаг *в–г*):

$$R^{\Sigma}_{\text{кя}} = \frac{R_{\text{кя}} \cdot R'''_{\text{кя}}}{R_{\text{ск}} + R'''_{\text{кя}}}. \tag{4}$$

Используя выражения (1), (2) для участков цепи, соответствующих барьерному слою, получим последовательно соединенные емкость $C'_{\text{б}}$ и сопротивление $R'_{\text{б}}$:

$$C'_{\text{б}} = C_{\text{б}}\left(1+\omega^2\tau_{\text{б}}^2\right)\Big/\omega^2\tau_{\text{б}}^2, \quad R'_{\text{б}} = R_{\text{б}}\Big/\left(1+\omega^2\tau_{\text{б}}^2\right). \tag{5}$$

А так же произведем аналогичные преобразования для $R^{\Sigma}_{\text{кя}}$ и $C^{\Sigma}_{\text{кя}}$:

$$C^{\Sigma}_{\text{кя}} = C''_{\text{кя}}\left(1+\omega^2\tau^{\Sigma 2}_{\text{кя}}\right)\Big/\omega^2\tau^{\Sigma 2}_{\text{кя}}, \quad R^{\Sigma'}_{\text{кя}} = R^{\Sigma}_{\text{кя}}\Big/\left(1+\omega^2\tau^{\Sigma 2}_{\text{кя}}\right). \tag{6}$$

Таким образом, получим ЭС, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений и емкостей, выражения для которых известны и которые могут быть заменены одним эквивалентным сопротивлением и одной эквивалентной емкостью. Учтя, что гетероструктура с числом КЯ, равным m, будет иметь $m+1$ барьерных слоев, получим выражения для них (переход *г–д* на рис. 1):

$$C_{\text{гс}}^{-1} = \frac{m}{C^{\Sigma}_{\text{кя}}} + \frac{m+1}{C'_{\text{б}}}, \quad R_{\text{гс}} = (m+1)R'_{\text{б}} + mR^{\Sigma'}_{\text{кя}}. \tag{7}$$

Выводы. Исходя из физических представлений о процессах в гетероструктуре, предложена ее эквивалентная схема, учитывающая наличие нескольких квантовых ям, а также зависимость токов инжекции в КЯ и сквозного тока от напряжения смещения *p–n*-перехода. Рассчитаны зависимости эквивалентных параметров от частоты тестового сигнала и схемы соединения, выбранной в виде последовательно-параллельно соединенных емкостей и сопротивлений, а также от параметров барьерных слоёв и квантовых ям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Секен К., Томпсон М. Приборы с переносом заряда. – М.: Мир, 1978. – 327 с.

2. Давыдов В.Н., Новиков Д.А. Эквивалентная схема гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 102–109.

УДК 621.315.82.2

ОСОБЕННОСТИ ТОКОПРОТЕКАНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Т.Д. Токмашев, студент каф. ЭП

Научный руководитель В.Н. Давыдов, проф. каф. ЭП, д.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, priplushed@gmail.com

Рассматриваются механизмы поставки электронов в квантовые ямы (КЯ) гетероструктуры. Установлено, что основными механизмами инжекции являются надбарьерная диффузия свободных носителей заряда из барьера в КЯ, а также их туннелирование сквозь потенциальный барьер (КЯ-барьер) на состояния размерного квантования. Получено аналитическое выражение для тока инжекции, учитывающее установленные механизмы поставки носителей, заполнение участвующих уровней энергии электронов, местоположение и величину барьера каждой ямы. Найдено дифференциальное сопротивление гетероструктуры, учитывающее особенности токопротекания.

Ключевые слова: гетероструктура, квантовая яма, туннелирование, ток инжекции, дифференциальное сопротивление.

Понимание механизмов формирования тока инжекции носителей заряда в КЯ, а также причин, определяющих уровень тока, позволяет получить четкие представления как о люминесцентных свойствах гетероструктуры (ГС), так и о физических процессах, определяющих эффективность источника оптического излучения [1].

В настоящее время имеются данные об особенностях формирования и протекания тока в ГС с КЯ [2, 3]. Основная часть этих работ направлена на выяснение причин снижения эффективности свечения ГС при больших значениях прямых токов. Как результат, многие вопросы формирования полного тока в ГС с МКЯ остаются не рассмотренными. В работах [3, 4] предложена эквивалентная схема (ЭС) гетероструктуры с КЯ, а также получены аналитические выражения для расчета ее элементов, что позволяет вычислять емкостные и релаксационные свойства ГС. Однако для корректного сопоставления экспериментальных результатов с расчетными значениями необходимо снятие допущений, положенных в основу аналитического описания элементов ЭС [3, 4].

Целью данной работы является построение модели тока инжекции в ГС с КЯ с учетом различных механизмов попадания носителей на уровни размерного квантования состояния в ямах перед тем, как быть захваченными ими, а также расчет дифференциального сопротивления поставки носителей заряда в КЯ.

Вольт-амперная характеристика гетероструктуры с КЯ. Для понимания токопротекания в ГС в первом приближении рассмотрим механизмы формирования тока инжекции, который представляет собой ток, расходуемый из полного тока на заполнение КЯ. В ГС с числом КЯ, равным m, ток на прямой ветви ВАХ будет равен сумме токов инжекции в отдельные КЯ. Тогда выражение для ВАХ ГС с КЯ при напряжении смещения V будет иметь вид

$$I_{\text{гс}}(V) = \left\{ \sum_{j=1}^{m} \left[I_{j\ inj} \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_j}{kT} \right) \right] \right\} \cdot \exp\left(-\frac{qV}{kT} \right) - I^0 . \qquad (1)$$

Для использования (1) необходимо знать токи инжекции в КЯ электронов и дырок. Для этого требуется рассмотреть основные механизмы заполнения КЯ при прямых смещениях.

Токи эмиссии и инжекции в гетероструктуре с МКЯ. Для описания влияния КЯ на токопротекание будем рассматривать КЯ как области конечной толщины со своей структурой энергетических уровней в зоне проводимости $E_n^{(qw)}$ и в валентной зоне $E_p^{(qw)}$. Тогда токи инжекции в j-ю КЯ будут складываться из двух токов разной природы: диффузионных токов основных носителей заряда над барьером. В дополнение к ним поставка носителей заряда в квантовые ямы осуществляется за счёт их туннелирования из зоны проводимости барьерного слоя на состояния ямы. На рис. 1 показано заполнение

надбарьерными электронами и дырками уровня $E_{hn}^{(qw)}$. Такая ситуация характерна для сравнительно больших смещений.

Если верхний уровень энергии электрона в *n*-КЯ занят частично, то возможно туннелирование электронов из зоны проводимости правого барьера на уровень $E_{hn}^{(qw)}$ в точку T_n с энергией $E(T_n)$. Как показано на рис. 1, в этой схеме принимают участие электроны с энергией E из диапазона $E_A \le E \le E_C$. На пути «3» электроны могут релаксировать на более низкий уровень энергии КЯ и впоследствии прорекомбинировать с дыркой из *p*-КЯ.

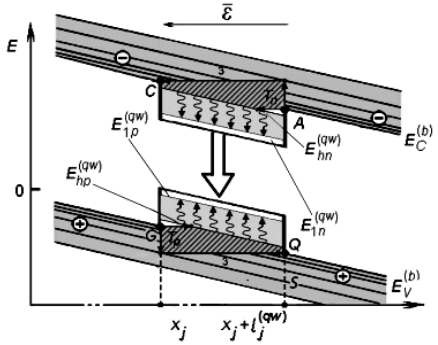


Рис. 1. Надбарьерное и туннельное занолнение состояния в КЯ

Вероятность инжекции электронов в *j*-ю КЯ по пути «3» будет произведением вероятностей туннелирования на уровень $E_{hn}^{(qw)}$ – Rt_{jn} на число электронов в зоне проводимости барьера, на число пустых мест на уровне $E_{hn}^{(qw)}$ и вероятность получения электронами недостающей энергии

$$Pt2_{j\ inj}^{(n)} = \int_{E_{hn}^{(qw)}\left(x_j^{(qw)}\right)}^{E_{hn}^{(qw)}\left(x_j\right)} N_C^{(qw)}\left(E'\right)\cdot\left(1-f_n\left(E'\right)\right)\times$$

$$\times \int_{E(A)}^{\infty} N_C^{(b)}\left(E''\right)\cdot f_n\left(E''\right)\cdot Rt2_{jn}\left(E',E''\right)\cdot\exp\left(-\frac{E_C^{(b)}+E''}{kT}\right)dE''dE'. \qquad (2)$$

Здесь $E_{hn}^{(qw)}(x) = E_{hn}^{(qw)}\left(x_j^{(qw)}\right)+\left(x_j^{(qw)}-x\right)\cdot\mathrm{tg}\,\alpha$; $Rt_{2\,jn}\left(E',E''\right)$ – вероятность туннельного перехода электрона из зоны проводимости

барьерного слоя на уровень $E_{hn}^{(qw)}$ в точку с энергией E'; E'' – текущее значение энергии в зоне проводимости правого барьерного слоя. Тогда ток инжекции электронов в *j*-ю КЯ по второй схеме инжекции будет

$$I_{2\,j\,inj}^{(n)} = I_{j\,em}^{(n)} \cdot Pt_{2\,j\,inj}^{(n)} . \qquad (3)$$

Данный способ инжекции носителей заряда в КЯ эффективен при малых углах наклона энергетической диаграммы *a*, т.е. при высоких прямых напряжениях смещения $|V| \approx \phi_b$.

Для работы ГС необходима поставка носителей в активную область, где находятся области излучательной рекомбинации (КЯ). В предположении бесконечно проводящих КЯ определим дифференциальное сопротивления поставки носителей заряда в *j*-ю КЯ для электронов.

В области прямых смещений, при котором ток $I_{inj}(V) >> I^0$ расходуется на инжекцию заряда в КЯ, дифференциальное сопротивление инжекции электронов в КЯ определяется выражением

$$R_{inj}(V) \cong \frac{kT}{qI_{inj}^0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right). \qquad (4)$$

Здесь $I_{inj}^0 = \sum_{k=1}^{m}\left[\left(I_{k\,inj}^{(n)} \cdot I_{k\,inj}^{(p)}\right) \Big/ \left(I_{k\,inj}^{(n)} + I_{k\,inj}^{(p)}\right)\right] \cong \sum_{k=1}^{m} I_{k\,inj}^{(n)}$ – ток инжекции через КЯ при V=0.

Току инжекции электронов по выражению (4) соответствует дифференциальное сопротивление поставки свободных носителей заряда в *j*-ю КЯ, которое при наличии напряжения смещения V (для V<0) имеет следующий вид:

$$R_{j\,inj}(V) \cong \left| \frac{R_j^0}{\left(Pt1_j + Pt2_j\right) + \left[\left(\partial Pt1_j / \partial E\right) + \left(\partial Pt1_j / \partial E\right)\right]} \right|_{V=0} \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right). \qquad (5)$$

Здесь $R_j^0 = kT \Big/ qI_{j\,em}^{(n)}$ – сопротивления ГС без КЯ. Выражение (5) предсказывает уменьшение сопротивления поставки носителей заряда с ростом прямого напряжения. Однако ввиду зависимостей вероятностей инжекции носителей в КЯ по различным путям оно показывается сложнее полученного для диффузионного *p*–*n*-перехода.

Выводы. Получено выражение для тока инжекции в КЯ, учитывающие степень заполнения участвующих уровней, резистивное вли-

яние предыдущих ям, их положение относительно эмиттеров и величину барьера для каждой ямы, а также величину напряжения смещения *p*–*n*-перехода. В рамках развиваемого диффузионного проникновения носителей заряда в КЯ вычислено дифференциальное сопротивление инжекции в КЯ. Полученные зависимости токов и сопротивлений от напряжения структурно сходны с классическими зависимостями, но имеют больший коэффициент неидеальности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schubert E.F. Light-Emitted Diodes. – Cambridge, 2006. – 436 p.

2. Hori A., Yasunaga D., Satake A., Fujiwara K. Temperature dependence of electroluminescence intensity of green and blue InGaN single-quantum-well light-emitting diodes // Appl. Phys, Lett. – 2001. – Vol. 79. – P. 3723.

3. Давыдов В.Н., Новиков Д.А. Эквивалентная схема гетероструктуры с множественными квантовыми ямами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 102–109.

4. Давыдов В.Н. Определение элементов гетероструктур с множественными квантовыми ямами // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 127–133.

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.*

А.А. Игумнова, Н.А. Игумнова
ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ 11
А.Д. Леонтьев
СПОСОБ АДАПТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРЕКЦИИ В ВАТТМЕТРАХ НА ОСНОВЕ ДИОДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ 13
К.Д. Зайков
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПО УГЛОВОЙ КООРДИНАТЕ И ДАЛЬНОСТИ MIMO-РАДАРА С ЛЧМ-СИГНАЛОМ 17

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*

И.В. Соболинский, А.С. Ларюшин, Д.А. Михеева, А.С. Быстрицкий, Е.А. Смирнов
СОЗДАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ТАБЛО ИНФОРМАЦИИ НА БАЗЕ STM32 21

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.*

В.С. Черный*, А.А. Донгак**
ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ ОБЕСПЕЧЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ 24

С.И. Разгуляев, В.Е. Филатова
MATLAB-SIMULINK-МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ПО ПРОТОКОЛУ BB84 28
С.И. Разгуляев, В.Е. Филатова, А.О. Кирнос
MATLAB-SIMULINK-МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ПО ПРОТОКОЛУ B92 31
А.В. Местников
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ Х-ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ 35
А.Б. Петров
ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БПЛА) 38
Р.Е. Зейнелгаби
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМЫ ДОГЕРТИ И УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ В РЕЖИМЕ КЛАССА АВ 42
А.Н. Глазырин, Р.Е. Зейнелгаби
СВЧ-УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ L-ДИАПАЗОНА 45
А.М. Досанов, А.В. Кондратенко, Д.С. Брагин, Д.Д. Зыков
РАЗРАБОТКА GaN АТТЕНЮАТОРА И ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ В МОНОЛИТНОМ ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ 49

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.*

М.А. Бабенко
СПОСОБЫ SMM-ПРОДВИЖЕНИЯ ФОТОГРАФА 54
И.А. Есентаева
МЕТОДЫ ТРИАНГУЛЯЦИИ И ТРИЛАТЕРАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ 56
И.А. Есентаева
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАСШТАБИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ 60
Т.Ю. Гребёнкина
РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ КЛАССИФИКАЦИИ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ ДЛЯ ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ 63

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.*

Л.Н. Андрийчук
АНАЛИЗ ОТРАСЛИ «РАДИОФОТОНИКА» В РОССИИ 66

И.А. Белокрылов
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ В КАНАЛАХ С АДДИТИВНЫМ БЕЛЫМ ГАУССОВСКИМ ШУМОМ 68

З.О. Поддубная
МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАНКА ФИЛЬТРОВ 71

Н.В. Познахарёв
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАЗБОРЧИВОСТИ РЕЧИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АУДИОКОДЕКА AMBE+2 74

Л.Ю. Шейникова
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ ИМИТАТОР БЕСПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ В АКУСТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ПЕРСОНАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРА 77

К.Е. Ткаченко, А.Л. Федоренко
РУПОРНАЯ Н-СЕКТОРИАЛЬНАЯ АНТЕННА ДИАПАЗОНА 25–35 ГГц 79

Н.А. Мельников, Т.В. Васильева
СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНИПУЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ 82

Т.В. Васильева, Н.А. Мельников
ШУМОВАЯ СИСТЕМА РАДИОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗАДЕРЖАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ 84

У.С. Жармухамбетова, А.И. Арзамасцев
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ 87

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

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

А.А. Изюмов, А.А. Карпешкина, Р.В. Саблин, М.Д. Жумабек
СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТА НА ОСНОВЕ КАМЕРЫ PIXY CMUCAM5 91

Ю.А. Поярков, А.А. Супин, Л.В. Ципилев
ОБУЧЕНИЕ РОБОТЕХНИКЕ ОТ LEGO ДО ARDUINO 94
А.С. Сарсенбаев, Н.М. Зальцман
ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ
ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
НЕФТЕГАЗОВОГО ТРУБОПРОВОДА 97

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.*

В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга, Р.А. Калменов
НОВЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ASYMN EXTENDED
И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ТЕСТОВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ 101
Т.Н. Файль, Ю.А. Новичкова, А.Е. Горяинов,
А.А. Калентьев, А.С. Сальников
ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПАССИВНЫХ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА 104
А.А. Кун
ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЕМ
ВСТРОЕННОЙ КАЛИБРОВКИ 106
Ю.А. Новичкова, Т.Н. Файль, А.Е. Горяинов
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
РЕЗУЛЬТАТОВ СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ 107

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.*

И.А. Арынов
КОЖНО-ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ 111

Н.К. Афанасьев, А.С. Степанова, А.В. Кинах
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ
В СИД НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ 114
Ю.Д. Люшневская, Ф.А. Губарев
РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА
ДЛЯ АНАЛИЗА СВЕРТЫВАЕМОСТИ КРОВИ 117
Д.Ю. Медведев, С.Г. Еханин
СПОСОБ СОЗДАНИЯ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛА NaCl
С ПОПАРНО КВАНТОВО-ЗАПУТАННЫМИ ПИКСЕЛЯМИ 119
Д.Ю. Попов, А.А. Швадленко
УСТРОЙСТВО ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СЛАБЫХ ПОСТОЯННЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ТОКОВ 122
Д.Н. Вахрушева
ВЗАИМОСВЯЗЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СВЕТОВЫХ
МЕЛЬКАНИЙ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА 124

ПОДСЕКЦИЯ 2.2
РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – **Лощилов А.Г.**, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н., доцент;*
*зам. председателя – **Бомбизов А.А.**, начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

Р.В. Кирсанов
РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ УРОВНЯ
ЗАРЯДА БАТАРЕИ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА 128
И.С. Железнов, А.А. Ачилов, А.А. Колесников,
Д.А. Илюхин, А.Д. Большаков
УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ 131
В.В. Лодяев, К.В. Лисихин, В.М. Кобзев
РАЗРАБОТКА ПЫЛЕВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО КОРПУСА
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТИ 133
К.С. Колесов, С.А. Рамазанова, И.П. Шарков
МАКЕТ УСТРОЙСТВА ПРЕЦИЗИОННОГО ДОЗИРОВАНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАСТ 135
В.С. Ваняшин
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОПРОЦЕССОРОВ 138

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – ***Троян П.Е.****, зав. каф. ФЭ, д.т.н., проф.;*
зам. председателя – ***Смирнов С.В.****, проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

А.Е. Петров, В.Т. Чан
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ЕЕ СВОЙСТВА 142

Д.А. Гринько
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФОТОЛИТОГРАФИИ 145

К.И. Карпов
УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОМ МИШЕНИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМЕ 148

А.А. Климов
ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ 151

А.В. Казаков, А.С. Кузьмин, А.В. Медовник
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО В ФОРВАКУУМНОМ ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ 154

Т.Ф. Марчук, В.Т. Чан
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛОКЕРАМИКИ НА ИХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ СПЕКАНИЕ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ 157

А.Н. Шалев, О.Н. Минин
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ БАРЬЕРНЫХ КОНТАКТОВ К АРСЕНИДУ ГАЛЛИЯ 160

И.П. Шарков
АДДИТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРИТОВЫХ СТРУКТУР 163

Н.А. Шелестов
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АДГЕЗИОННОГО ПОДСЛОЯ ИЗ ХРОМА, НАНЕСЕННОГО МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ И МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ 165

А.А. Шейнбергер
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ РИСУНКА МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ КОНТАКТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ 167

А.А. Климов, А.Н. Лапин
ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОННОГО СПЕКТРА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ 170

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.*

А.И. Бартенев, Н.С. Легостаев
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНОГО КЛАМПА ВО ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ 175

А.И. Бартенев, Н.С. Легостаев
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОЭМИССИИ ПРЯМОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С СИНХРОННЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ И АКТИВНЫМ КЛАМПОМ ВО ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ 178

К.Ж. Калжанов, Д.Б. Бородин
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМ МОДУЛЕМ 180

И.А. Чернецкий, П.А. Стрельников
ДВУХТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИ РАБОТЕ НА ПРОТИВОЭДС 183

Д.Н. Данилов, В.А. Лозовик, П.А. Стрельников
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ 187

Д.Э. Шенцов, М.Д. Роговцев, М.Е. Емельянов, В.И. Тяпкин, В.А. Копылов
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПАРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОКЛИМАТА В СЕРВЕРНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ 191

И.А. Королёв, И.В. Калиновский
ЭЛЕКТРОННЫЕ НАГРУЗКИ 193

Д.И. Люшневский
ГЕНЕРАТОР ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СИГНАЛОВ 195

Н.С. Легостаев, В.А. Серов
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХПОРТОВОГО ДВУНАПРАВЛЕННОГО С СИММЕТРИЧНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И РЕЗОНАНСНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ТРАНЗИСТОРОВ 198

В.А. Шарыгин
УСТРОЙСТВО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 203

В.А. Шарыгин
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО АППАРАТАМ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ 207

И.О. Суховерков
ИСКРОБЕЗОПАСНЫЕ ЦЕПИ КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ 210
И.О. Суховерков
ПРИНЦИП РАБОТЫ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СХЕМЫ ОГРАНИЧИТЕЛЬНОГО ШУНТА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ 213

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.*

Д.К. Романенко, А.В. Сокольников, М.Н. Гаппарова
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОФОКУСИРОВКИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ДИФРАКЦИОННОЙ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ 216
Е.В. Морозова
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ПУЧКАХ ЭЙРИ 219
С.Б. Зыль
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ 222

ПОДСЕКЦИЯ 2.6
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

*Председатель – **Заболоцкий А.М.**, проф. каф. ТУ, д.т.н., доцент; зам. председателя – **Куксенко С.П.**, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

О.М. Кузнецова-Таджибаева
МОДИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДАЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ 225
А.В. Медведев
АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО ОТКЛИКА ПЛОСКОГО КАБЕЛЯ С МОДАЛЬНЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОЕДИНЕНИИ ОПОРНЫХ ПРОВОДНИКОВ 228
Т.А. Шершнева, И.С. Марков, Е.С. Жечев
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ОТ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА 231

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.*

Н.О. Студенков, В.О. Касьянов, А.В. Кислова
ЗАРЯДНАЯ СТАНЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОДИОДНОЙ ИНДИКАЦИИ 234

А.А. Климов, Т.Д. Токмашев
ЕМКОСТНОЕ И РЕЗИСТИВНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ 237

А.А. Климов, Т.Д. Токмашев
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ЕМКОСТНОГО И РЕЗИСТИВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ 240

Т.Д. Токмашев, А.А. Климов
ПРОФИЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СТРУКТУРАХ С *p*–*n*-ПЕРЕХОДОМ 243

Н.О. Студенков, В.О. Касьянов, А.И. Окуневский, Б.Д. Зейнадилова
УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРИПАЙКИ ДРАЙВЕРА ПИТАНИЯ К СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЕ С ЦОКОЛЕМ E27 246

Д.В. Соколов, В.А. Пахоруков
IT-СПОСОБ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХПОЛЮСНИКА 249

Т.Д. Токмашев
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ 252

Т.Д. Токмашев
ОСОБЕННОСТИ ТОКОПРОТЕКАНИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ 255

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

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2020

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

13–30 мая 2020 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Издательство «В-Спектр».
Сдано на верстку 15.04.2020. Подписано к печати 20.05.2020.
Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная. Печ. л. 17,1
Тираж 100 экз. Заказ 8.

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. 49-09-91
E-mail: bvm@sibmail.com