

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР



ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2024»

г. Томск, 15–17 мая 2024 г.
(в трех частях)

ЧАСТЬ 1

г. Томск

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

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

**по материалам
международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2024»**

15–17 мая 2024 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

ТУСУР
В-Спектр
Томск, 2024

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

С 23

С 23 Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 15–17 мая 2024 г.: в 3 ч. – Томск: ТУСУР (заказчик); В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева, исполнитель), 2024. – Ч. 1. – 316 с.

ISBN 978-5-902958-23-9

ISBN 978-5-902958-24-6 (Ч. 1)

ISBN 978-5-902958-25-3 (Ч. 2)

ISBN 978-5-902958-26-0 (Ч. 3)

1 часть – 1-я секция (подсекции 1.1 – 1.7); 2-я секция (подсекции 2.1 – 2.4).

2 часть – 2-я секция (подсекции 2.5 – 2.7); 3-я секция (подсекции 3.1 – 3.7); 6 секция, 8 секция.

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

7 секция издана отдельным сборником.

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

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

ISBN 978-5-902958-23-9

ISBN 978-5-902958-24-6 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2024

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

по материалам
международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2024», 15–17 мая 2024 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Рулевский В.М. – председатель Программного комитета, ректор ТУСУРа, д.т.н.;
- Лоцилов А.Г. – заместитель председателя Программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, к.т.н.;
- Афонасова М.А., зав. каф. менеджмента ТУСУРа, д.э.н., проф.;
- Бабур-Карателли Г.П., к.т.н., PhD (TU Delft), научный сотрудник лаборатории радиооптики каф. ТОР ТУСУРа;
- Беляев Б.А., зав. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники Института физики СО РАН, д.т.н., г. Красноярск (по согласованию);
- Ботаева Л.Б., руководитель направления по оказанию инжиниринговых услуг, АНО «Томский региональный инжиниринговый центр», к.т.н. (по согласованию);
- Васильковская Н.Б., доцент каф. экономики ТУСУРа, к.э.н.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС ТУСУРа, к.т.н.;
- Денисов В.П., проф. каф. РТС ТУСУРа, д.т.н.;
- Дмитриев В.М., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.ф.-м.н.;
- Заболоцкий А.М., зав. каф. СВЧиКР ТУСУРа, д.т.н.;
- Зариковская Н.В., доцент каф. АОИ ТУСУРа, к.ф.-м.н.;
- Зейниденов А.К., PhD, декан физико-технического факультета НАО Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, проф., г. Караганда (Казахстан) (по согласованию);
- Исакова А.И., доцент каф. АСУ ТУСУРа, к.т.н.;
- Карташев А.Г., проф. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.б.н.;
- Катаев М.Ю., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Ким М.Ю., зав. каф. ИСР ТУСУРа, к.и.н.;
- Кобзев Г.А., проректор по международному сотрудничеству, к.т.н.;
- Костина М.А., доцент каф. УИ, к.т.н.;
- Коцубинский В.П., зам. зав. каф. КСУП ТУСУРа, доцент каф. КСУП, к.т.н.;
- Красинский С.Л., декан ЮФ ТУСУРа, к.и.н.;

- Куприянов Е.А., директор Центра по работе с талантливой молодежью ТУСУРа;
- Лукин В.П., зав. лаб. когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН, д.ф.-м.н., проф., г. Томск (по согласованию);
- Малюк А.А., проф. отделения интеллектуальных кибернетических систем офиса образовательных программ, Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ, к.т.н., г. Москва (по согласованию);
- Малютин Н.Д., гл.н.с. НИИ Систем электрической связи, проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.т.н.;
- Мицель А.А., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Озеркин Д.В., декан РКФ ТУСУРа, к.т.н.;
- Орлова В.В., зав. каф. ФиС ТУСУРа, д.соц.н.;
- Осирко В.О., н.с. лаборатории прикладной электроники ИСЭ СО РАН, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н. (по согласованию);
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ ТУСУРа, к.фил.н.;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР, декан факультета радиотехники и электроники, Новосибирский государственный технический университет, д.т.н., г. Новосибирск (по согласованию);
- Рогожников Е.В., зав. каф. ТОР ТУСУРа, к.т.н.;
- Ромашко Р.В., член-корреспондент РАН, директор ИАПУ ДВО РАН, д.ф.-м.н., проф., г. Владивосток (по согласованию);
- Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, к.т.н.;
- Семенов Э.В., проф. каф. РСС ТУСУРа, д.т.н.;
- Сенченко П.В., проректор по учебной работе ТУСУРа, доцент каф. АОИ, к.т.н.;
- Титов В.С., зав. каф. вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, д.т.н., проф., заслуженный деятель наук РФ, академик международной академии наук ВШ, г. Курск (по согласованию);
- Троян П.Е., зав. каф. ФЭ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н.;
- Цветкова Н.А., доцент Высшей школы проектной деятельности и инноваций в промышленности института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, к.т.н., г. Санкт-Петербург (по согласованию);
- Чжан Е.А., зам. директора по информационной политике Института космических и информационных технологий (ИКИТ) по научной работе, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», к.т.н. (по согласованию);
- Шарангович С.Н., проф. каф. СВЧиКР ТУСУРа, к.ф.-м.н.;
- Шелупанов А.А., президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.;
- Шурыгин Ю.А., директор департамента управления и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.;
- Krozer V., professor at Goethe University, Frankfurt am Main (по согласованию).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1. Радиотехника и связь

Подсекция 1.1. Радиотехнические системы и распространение радиоволн. *Председатель секции – Денисов Вадим Прокопьевич, проф. каф. РТС, д.т.н.; зам. председателя – Аникин Алексей Сергеевич, доцент каф. РТС, к.т.н.*

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

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

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

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

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

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

Секция 2. Электроника и приборостроение

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

Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры. *Председатель секции – Лоцилов Антон Геннадьевич, проректор по НРиИ, зав. каф. КУДР, к.т.н.; зам. председателя – Бомбизов Александр Александрович, начальник СКБ «Смена», доцент каф. КУДР, 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 – Семенов Валерий Дмитриевич, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.; зам. председателя – Оскирко Владимир Олегович, н.с. лаборатории прикладной электроники ИСЭ СО РАН, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.; Михальченко Сергей Геннадьевич, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.*

Подсекция 2.5. Оптические информационные технологии, нанофотоника и оптоэлектроника. *Председатель секции – Шарангович Сергей Николаевич, проф. 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, зав. каф. СВЧиКР, д.т.н.; зам. председателя – Белоусов Антон Олегович, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

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

Секция 3. Информационные технологии и системы

Подсекция 3.1. Интегрированные информационно-управляющие системы. *Председатель секции – Катаев Михаил Юрьевич, проф. каф. АСУ, д.т.н., проф.; 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 УР, доцент каф. АОИ, к.т.н.; зам. председателя – Сидоров Анатолий Анатольевич, зав. каф. АОИ, к.э.н.*

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

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

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

Подсекция 3.6. Разработка программного обеспечения. *Председатель секции – Зариковская Наталья Вячеславовна, доцент каф. АОИ, ген. директор ООО «АльдераСофт», к.ф.-м.н.; зам. председателя – Колотаев Илья Владимирович, главный разработчик ООО «Газпром ЦПС».*

Подсекция 3.7. Инструментальные средства автоматизации проектирования, управления и обработки данных. *Председатель секции – Хабибулина Надежда Юрьевна, декан ФВС, доцент каф. КСУП, к.т.н.; зам. председателя – Потапова Евгения Андреевна, ст. преподаватель каф. КСУП.*

Секция 4. Информационная безопасность

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

Подсекция 4.2. Цифровые системы радиосвязи и средства их защиты. *Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, к.т.н.*

Подсекция 4.3. Экономическая безопасность. *Председатель секции – Кузьмина Елена Александровна, проректор по программам развития, к.т.н.; зам. председателя – Колтайс Андрей Станиславович, ст. преподаватель каф. ЭБ.*

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, д.т.н.*

- Подсекция 5.2. Информационные системы в экономике. *Председатель секции – Исакова Анна Ивановна, доцент каф. АСУ, к.т.н.; зам. председателя – Григорьева Марина Викторовна, доцент каф. АСУ, к.т.н.*
- Подсекция 5.3. Реализация современных экономических подходов в финансовой и инвестиционной сферах. *Председатель секции – Васильковская Наталья Борисовна, доцент каф. экономики, к.э.н.; зам. председателя – Цибульников Валерия Юрьевна, зав. каф. экономики, к.э.н.*
- Подсекция 5.4. Проектный менеджмент и его использование в цифровой экономике. *Председатель секции – Афонасова Маргарита Алексеевна, зав. каф. менеджмента, д.э.н., проф.; зам. председателя – Богомолова Алена Владимировна, доцент каф. менеджмента, декан ЭФ, к.э.н.*
- Подсекция 5.5. Современные социокультурные технологии в организации работы с молодежью. *Председатель секции – Орлова Вера Вениаминовна, зав. каф. ФиС, директор НОЦ «СГТ», д.соц.н., проф.; зам. председателя – Мальцева Мария Александровна, старший преподаватель каф. ФиС.*
- Подсекция 5.6. Актуальные проблемы социальной работы в современном обществе. *Председатель секции – Ким Максим Юрьевич, зав. каф. ИСР, к.и.н.; зам. председателя – Куренков Артем Валериевич, доцент каф. ИСР, к.и.н.*
- Подсекция 5.7 Актуальные вопросы частного права в условиях цифровой трансформации. *Председатель секции – Мельникова Валентина Григорьевна, доцент, зав. кафедрой ИГПиПОИД, к.ю.н.; зам. председателя – Часовских Кристина Викторовна, ст. преподаватель каф. ИГПиПОИД.*
- Подсекция 5.8. Современные тенденции развития российского права. *Председатель секции – Ахмедшин Рамиль Линарович, проф. каф. ГПДиПД, д.ю.н.; зам. председателя – Алексеева Татьяна Александровна, доцент каф. ГПДиПД, к.ю.н.*
- Секция 6. Экология и мониторинг окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности.** *Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н., проф.; зам. председателя – Денисова Татьяна Владимировна, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.*
- Секция 7. Открытия. Творчество. Проекты.** (Секция для школьников). *Председатель секции – Куприянов Евгений Александрович, директор Центра по работе с талантливой молодежью ТУ-СУРА; зам. председателя – Михальченко Татьяна Сергеевна, специалист по работе с молодежью ОПиРШ УНН.*

Секция 8. Postgraduate and Master Students' Research in Electronics and Control Systems. *Председатель секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, доцент, к.филос.н.; зам. председателя – Шнит Елена Ирисметовна, доцент 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

Сборник в 3 частях:

1 часть – 1-я секция (подсекции 1.1 – 1.7); 2-я секция (подсекции 2.1 – 2.4).

2 часть – 2-я секция (подсекции 2.5 – 2.7); 3-я секция (подсекции 3.1 – 3.7);
6 секция, 8 секция.

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

7 секция издана отдельным сборником.

ГЕНЕРАЛЬНЫЕ СПОНСОРЫ

ООО «Научные приборы
и системы»



АО «НПФ «Микран»



АО «НИИПП»



Томское региональное отделение
ООО «Союз машиностроителей
России»



СПОНСОРЫ

ООО «СТК», г. Томск



ООО «500m ТЕХНОЛОДЖИЗ»



АО «ИнфоТеКС»



**Генеральный спонсор конференции –
группа компаний «Научное оборудование»**



Группа компаний
«Научное оборудование»
630090, Россия,
г. Новосибирск,
ул. Николаева, 11/5

Тел.: (383-3) 30-82-95
Эл. почта:
sales@spegroup.ru
www.spegroup.ru

Группа компаний «Научное оборудование» была образована в 1999 г. Основное направление деятельности компании – снабжение высокотехнологичным оборудованием учебных, научно-исследовательских и промышленных предприятий Сибири и Дальнего Востока России.

Мы анализируем задачи заказчика, подбираем оборудование под каждый конкретный случай, осуществляем поставку оборудования, а также оказываем технологическую и методологическую поддержку, гарантийный и послегарантийный ремонт. Некоторые наши заказчики доверяют нам полное закрытие всех потребностей своих лабораторий и в оборудовании, и в расходных материалах.

В штате компании состоят высококвалифицированные технические специалисты с собственным опытом научной работы. Наши специалисты регулярно знакомятся с новинками оборудования, с новыми подходами в приборостроении, посещают международные выставки и обучающие семинары от производителей. Для каждой задачи заказчика мы можем предложить самое современное решение. Существующие рабочие связи со многими лабораториями СО РАН позволяют оперативно привлекать к решению задач заказчика профильных научных специалистов. Кроме того, мы сами организуем мастер-классы и семинары, на которых наши заказчики имеют уникальную возможность попробовать новейшее оборудование для решения своих задач.

У нас налажены партнерские отношения со многими ведущими мировыми производителями научного и технологического оборудования как в России, так и за рубежом. У компании есть свой инженерный департамент; в случае необходимости мы можем самостоятельно разработать решение непосредственно под задачу заказчика.

Нашими заказчиками являются все академические институты Сибирского отделения Российской академии наук, многие промышленные предприятия, технологические компании, учебные заведения высшего образования Сибирского и Дальневосточного регионов.

Кроме деятельности по поставке и разработке оборудования, мы участвуем в продвижении разработок институтов СО РАН на внеш-

ний рынок, организуем совместные проекты институтов СО РАН с разными организациями по разработке конкретных технологических и наукоёмких решений.

Компания «Научные приборы и системы» строго следует закону и считает недопустимыми какие-либо компромиссы в правовом аспекте – вся деятельность компании основана на соблюдении требований как российского законодательства, так и законодательства стран деловых партнеров.

Своей миссией мы видим деятельное участие в поступательном развитии научно-технического потенциала Сибири и Дальнего Востока путём построения и реализации долгосрочных отношений с широким кругом партнёров и выстраивания сети, в рамках которой наши заказчики могут эффективно взаимодействовать, объединяя усилия для достижения общих результатов.

Группа компаний «Научное оборудование» существует уже более 20 лет. Сотрудничество с нами всегда продуктивно, комфортно и происходит в атмосфере взаимопонимания. У нас много амбициозных и долгосрочных задач, но прежде всего мы работаем над тем, чтобы задачи наших партнеров были решены самым простым и в то же время наилучшим образом.

Приглашаем к долгосрочному и взаимовыгодному сотрудничеству!

Директор ООО «Научные приборы и системы»
Федоров Павел Леонидович

**Генеральный спонсор конференции –
АО «НПФ «Микран»**



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

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

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

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

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

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

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

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

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

Генеральный спонсор конференции –
АО «НПФ «НИИПП»



АО «НИИПП» 634034, г. Томск,
niipp@niipp.ru ул. Красноармейская, 99а
www.niipp.ru Тел.: +7 (382-2) 28-82-88

АО «НИИПП» входит в состав Союза машиностроителей России, являясь опорным предприятием объединения в регионе. С октября 2020 г. генеральный директор АО «НИИПП» Е.А. Монастырев возглавляет Томское региональное отделение «СоюзМаш России».

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

НИИПП основан в Томске в 1964 г. для разработки СВЧ0 и оптоэлектронных изделий на основе полупроводниковых соединений АЗВ5. Исследование нового материала – арсенида галлия – предопределило вектор развития предприятия на последующие 60 лет. В 1967 г. на базе института заработал завод по серийному выпуску полупроводниковых приборов. Начинаясь как научный институт, НИИПП и сегодня работает с ведущими вузами Томска: Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Томским политехническим университетом (ТПУ), Томским государственным университетом (ТГУ), Сибирским государственным медицинским университетом (СибГМУ). В 2022 г. у АО «НИИПП»

появилась вторая площадка по производству металлокерамических изделий, которая расположена в Великом Новгороде.

Основной девиз и принцип работы НИИПП – «Достижение науки – в производство».

Е.А. Монастырев: «Сохраняя традиционные направления, мы не стоим на месте, постоянно развиваемся, продолжаем работать с арсенидом галлия, производя интегральные схемы, отрабатываем нитрид-галиевую и фосфид-индиевую технологию. Позиции НИИПП в этом вопросе на российском и даже мировом рынке на хорошем уровне».

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

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

В НИИПП были созданы первые отечественные, не имеющие зарубежных аналогов монолитные интегральные схемы мм диапазона, обладающие уникальным сочетанием технологической простоты, высоких параметров и устойчивости к жестким внешним воздействиям. На основе этой технологии создаются образцы МИС и модулей на их основе самого разного типа (балансные смесители, двойные балансные смесители, смесители сдвига, детекторы, умножители частоты, квазимонолитные генераторы, модуляторы). Созданы образцы приемных и приемопередающих модулей в едином корпусе в 8, 5, 3 и 2 мм диапазоне. Проводится разработка монолитных интегральных схем для работы в диапазоне до 600 ГГц для радиоастрономических исследований и для зондирования атмосферы.

За время работы по направлению СВЧ-электроники на предприятии получено более 100 авторских свидетельств и патентов. Отдел СВЧ-электроники НИИПП в числе лидеров в области создания малогабаритных приемопередающих модулей и устройств для систем

ближней локации и радиовидения. Ежегодно АО «НИИПП» выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в рамках государственных программ.

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

Развитие оптоэлектроники шло по нескольким направлениям: повышение мощности излучения диодов, создание излучающих диодов для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), разработка излучающих диодов с повышенной стойкостью к дестабилизирующим факторам, создание интегрированных оптоэлектронных устройств. Наряду с разработкой специализированных излучающих диодов на предприятии создавались индикаторные светодиоды различного цвета свечения, велась работа по двойному применению мощных светоизлучающих диодов.

На предприятии действует **испытательный технический центр (ИТЦ)**, аккредитованный в системе добровольной сертификации «Электронсерт», оснащенный уникальным оборудованием. В том числе измерительными комплексами на базе спектрометра, гониометра и фотометрического шара фирмы Instrument Systems (Германия); переносными средствами измерений (люксметры, яркомеры, спектрометроколориметры); стационарными гониофотометрическими установками.

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

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

Серия SLED-Street. Светодиодные уличные светильники предназначены для освещения открытых пространств. Светильники данной линейки освещают объекты различных регионов России: парко-

вые и пешеходные зоны, улицы, автомобильные дороги, внутридомовые территории, охранные периметры, площади, тоннели, мосты, автостоянки, строительные площадки, промышленные объекты и здания, карьеры по добыче полезных ископаемых открытым способом, складские помещения, самолётные ангары, сборочные самолётостроительные помещения, судовые верфи, наружные и внутренние площади нефте- и газоперерабатывающих предприятий, нефтяных месторождений (кустов). Светильники этой линейки учитывают различия климатических зон России и успешно прошли испытания в суровых климатических условиях на северных нефтяных месторождениях.

Серия SLED-Office. Светильники этой линейки создают комфортное и естественное внутреннее освещение административных помещений, предприятий торговли, муниципальных учреждений – поликлиник, больниц, школ, вузов и библиотек. В зависимости от серии светильники предоставляют дополнительные возможности, в том числе дезинфекции помещений. Грамотный подбор и размещение осветительных приборов крайне важны для комфорта сотрудников, покупателей, посетителей, пациентов. А также для оптимизации расходов на освещение. Эксперты НИИПП предлагают комплексное решение и бесплатно выполняют светотехнический расчёт.

SLED-Prom – для торговых, производственных, складских и приравненных к ним помещений, общественных и административных учреждений, торговых залов, складов, общественных учреждений, в том числе для помещений с повышенным температурным режимом.

SLED-B-Ex – применяются для общего освещения взрывоопасных зон всех классов помещений и наружных установок согласно маркировке взрывозащиты. Светильники этой линейки защищены от грязи, пыли, снега и воды.

АО «НИИПП» разрабатывает и поставляет светосигнальную технику для водных путей России с 1998 г. Речная светотехника производства НИИПП зарекомендовала себя в работе во многих речных бассейнах России. У предприятия большой опыт установки световых модулей на бакены: более 160 тысяч сигнальных огней производства НИИПП стоят на реках от середины Волги до Амура и несколько десятков – в море Лаптевых. Продукция зарегистрирована в речном реестре и соответствует требованиям Международной ассоциации маячных служб (МАМС), имеет малое энергопотребление и отличную цветопередачу на большие расстояния, устойчивость к внешним воздействиям. АО «НИИПП» выпускает разные позиции светотехнического оборудования для водных путей: светосигнальные приборы для установки на береговые и плавучие навигационные знаки, автономные светосигнальные приборы с питанием от солнечной энергии, фо-

тоавтоматы пускорегулирующие, лампы полупроводниковые светодиодные для светосигнальных приборов кругового и секторного действия, в том числе для замены ламп накаливания на светосигнальных приборах старого типа.

В 2023 г. началась апробация инвестпроекта, реализуемого АО «НИИПП» и субсидируемого Министерством промышленности и торговли РФ, – «Система удаленного мониторинга и управления навигационными огнями». НИИПП, предлагая большой спектр светосигнальной техники, переходит к комплексным решениям для речных бассейнов, что соответствует утверждённому распоряжением Правительства РФ стратегии развития внутреннего водного транспорта РФ до 2030 г.

Система включает в себя программную часть, устройства связи и передачи информации, навигационные огни (круговые, направленные) со светосигнальным оборудованием и системой автономного питания. Для системы разработан уникальный автономный круговой навигационный огонь с удалённым управлением, перезаряжаемой аккумуляторной батареей и солнечными элементами. Устройство может быть дополнительно оснащено датчиками влажности, температуры, глубины и другими в зависимости от задач заказчика. Электронный модуль адаптирован к серийно выпускаемым плавучим навигационным огням производства АО «НИИПП».

Система даёт онлайн-информацию о местоположении огня, напряжении на аккумуляторе, качестве радиосвязи, времени последней связи с бакеном, какое управление настроено (ручное или автоматическое), состоянии огня в данный момент, режиме свечения, уровне освещённости. По всем параметрам можно строить графики за выбранный период.

Система удалённого мониторинга и управления навигационными огнями решает задачи:

- поступления информации к диспетчеру в режиме реального времени;
- полной информации обо всех элементах системы;
- при отсутствии возможности передачи данных по сотовой связи, задействуется способ связи через радиоканал («от огня к огню»). GSM-связь используется только в местах хорошей доступности.

В итоге система служит для повышения безопасности речного судоходства в РФ, экономии ресурсов (материального, временного, человеческого) администраций бассейнов внутренних водных путей.

В 2022 г. АО «НИИПП» представило уникальный для российского рынка продукт – **зондовые станции** собственного производства, предназначенные для измерений в области СВЧ-электроники (изме-

рения можно выполнять и на других материалах). В 2022/23 г. выполнены поставки ручных зондовых станций Omega Air-150 СОАХ на ведущие российские предприятия радиоэлектронной промышленности, в измерительные центры и научные лаборатории; заключены контракты на поставку полуавтоматических зондовых станций Terra-200 СОАХ; предприятие готово также выполнять поставки программно-аппаратных комплексов (ПАК) для измерения параметров монолитных интегральных схем на неразделенных полупроводниковых пластинах. Полностью российское решение задачи импортозамещения в условиях санкций, при этом более эффективное по соотношению цена/качество по сравнению с любыми импортными аналогами.

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

АО «НИИПП» уже 25 лет выпускает **реле контроля и защиты**, которые применяются для защиты трехфазных электроустановок любых производителей. В зависимости от диапазона контролируемых токов подбирается модель устройства одного из пяти типов: реле контроля и защиты (РКЗ, РКЗМ, РКЗ-И) и реле контроля, диагностики и защиты (РКД, РКДМ).

Выпуск **продукции медицинского назначения** в АО «НИИПП» начался в 1980-х гг. Сегодня это широкий спектр изделий, в том числе стимулятор желудочно-кишечного тракта «Сибириум» (в разных исполнениях, в том числе аппарат «Эректрон»), аппараты для свето-, цвето- и магнитотерапии серии «Геска». НИИПП также выпускает узкоспециализированную продукцию для медиков.

В 2023 г. на рынок выведен комплекс автоматизированного мониторинга и контроля состояния здоровья человека «СМОТР», предназначенный для автоматизации и оптимизации процесса прохождения медицинского контроля состояния здоровья производственного персонала, в том числе предсменного/послесменного состояния водителей. Программно-аппаратный комплекс позволяет осуществлять удаленный сбор, передачу и анализ данных о состоянии здоровья человека в рамках реализации услуг удаленного здравоохранения – телемедицины. Проект реализуется в рамках Постановления Правительства РФ от 17.02.2016 № 109 по соглашению с Минпромторгом РФ.

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

*Генеральный директор АО «НИИПП»
Монастырев Евгений Александрович*

Спонсор конференции –
ООО «Системы. Технологии. Коммуникации» (ООО «СТК»)



ООО «СТК»
634034, г. Томск,
ул. Кулёва, д. 24
<http://stc-tomsk.ru>

Т. +7 (382-2)
60-97-08, 90-56-10
Эл. почта:
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 разрешение 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 надёжную 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 масса 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: серверы записи и управления, рабочие места операторов, видеостены и мониторы отображения, видеокамеры внутреннего и наружного (до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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.

*Генеральный директор ООО «СТК»
Савин Андрей Дмитриевич*

НАШИ ЗАКАЗЧИКИ



НАШИ ВЕНДОРЫ



Спонсор конференции –
ООО «50ohm Technologies»

50ohm Technologies

✉ info@50ohm.tech ☎ +7-923-408-04-08
🌐 50ohm.tech/ru 📧 fiftyohm
📍 634045, г. Томск 🌐 fiftyohm

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

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

Компания реализует программные решения по направлениям:

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

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

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

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

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

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



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

**Спонсор конференции –
АО «ИнфоТеКС»**



АО «ИнфоТеКС»
127083, Москва,
ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

Т. 7 (495) 737-61-92
8 (800) 250-0-260
www.infotecs.ru

АО «ИнфоТеКС» является ведущим разработчиком, а также производителем высокотехнологичных программных и программно-аппаратных средств и систем защиты информации. Входит в ТОП-10 крупнейших российских компаний в сфере информационной безопасности. Будучи лидером, ИнфоТеКС активно развивает партнёрскую сеть, в которую на данный момент входит свыше 300 компаний. В штате трудоустроено более 1 600 сотрудников, а офисы открыты в 9 городах России.

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

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

Важным направлением для компании является поддержка научных разработок и исследовательских проектов, а также обучение и продвижение молодых специалистов.

Поэтому уже более 12 лет «ИнфоТеКС» активно работает над развитием потенциала будущего и реализует специальную программу стажировки «ИнфоТеКС Академия». Главная задача проекта – помо-

гать специалистам получать и эффективно использовать знания и навыки, необходимые для успешной работы в сфере информационной безопасности. Участники стажировки работают над реальными проектами компании под руководством опытных кураторов, а лучших из них «ИнфоТеКС» приглашает в ряды штатных сотрудников.

Кроме того, в рамках «ИнфоТеКС Академии» осуществляется грантовая программа, направленная на поддержку молодых учёных, формирование кадрового потенциала и развитие научно-исследовательской среды в области криптографии, ИТ- и ИБ-разработок. В рамках данной программы уже реализовано более 49 проектов и получено 7 патентов.

*Генеральный директор АО «ИнфоТеКС»
Чапчаев Андрей Анатольевич*

Секция 1
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

(подсекции 1.1 – 1.7; стр. 31 – 154)

Секция 2
ЭЛЕКТРОНИКА
И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

(подсекции 2.1–2.4; стр. 155 – 307)

Секция 1

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ПОДСЕКЦИЯ 1.1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

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

УДК 621.396.41

МАКЕТ МОДУЛЯ СВЯЗИ БПЛА НА БАЗЕ SDR-ПЛАТФОРМЫ

Г.А. Калашиников, Д.Д. Зайков, студенты каф. РТС

Научный руководитель Ф.Н. Захаров, доцент каф. РТС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, zakharovfn@main.tusur.ru

В рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» разработан макет модуля связи БПЛА на базе SDR-платформы для связи между БПЛА и между БПЛА и базовой станцией. Разработанный макет модуля связи обеспечивает дальность связи на расстояние не менее 2 км при скорости передачи информации не менее 100 кбит/с. Описан алгоритм работы макета модуля связи на базе SDR-платформы на основе структурных схем.

Ключевые слова: БПЛА, SDR-платформа, канал связи, приемник, передатчик.

В рамках программы «Приоритет 2030» разработан макет модуля связи БПЛА на базе SDR для связи между БПЛА и между БПЛА и базовой станцией. Организация связи на базе SDR-платформы позволяет изменять конфигурацию модуля связи, что дает возможность адаптировать его под решаемые задачи (мониторинг, управление, передача информации от полезной нагрузки и т.п.) с учетом состояния канала связи.

Целью статьи является изложение полученного результата, выполняемого в рамках программы «Приоритет 2030».

К разработке модуля связи выдвигались требования к обеспечению дальности связи на расстояние не менее 2 км при скорости передачи информации 100 кбит/с на частоте 915 МГц. В модуле связи реализовано шифрование передаваемой информации и помехоустойчивое кодирование.

Макет модуля связи представляет собой передатчик и приемник, реализованный на базе SDR. Структурная схема разработанного макета приведена на рис. 1. В качестве SDR-платформы используется USRP серии B210 [1]. Также в состав макета для передающего модуля входят источник питания, персональный компьютер (ПК), антенна с центральной частотой 915 МГц. Аналогичный состав имеет приемный модуль.

На рис. 2 представлена функциональная схема передатчика.

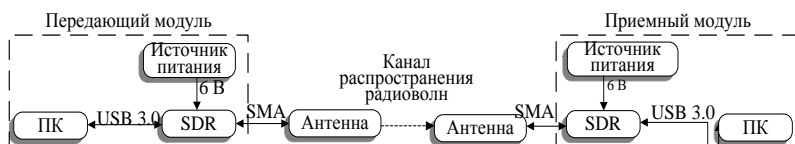


Рис. 1. Структурная схема макета модуля связи



Рис. 2. Функциональная схема передающего модуля

Передаваемое сообщение подается на блок шифрования (в качестве шифрования используется алгоритм AES-128 [2]). Зашифрованный сигнал подается на сверточный кодер, с порождающим полиномом (133,171) и скоростью кодирования 1/2 [3]. Закодированное сообщение поступает на блок скремблирования, который позволяет сбалансировать распределение нулей и единиц для обеспечения синхронизации в приемнике. Далее к скремблированному сообщению добавляется преамбула для нахождения начала кадра в приемнике. После этого, сообщение поступает на блок модуляции QPSK, переносится на несущую частоту и отправляется в эфир [2].

На рис. 3 представлена функциональная схема приемника.

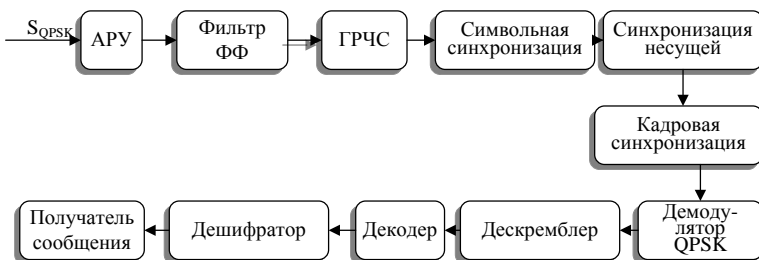


Рис. 3. Функциональная структурная схема приемного модуля

Входной сигнал поступает на блок АРУ, так как амплитуда принимаемого сигнала влияет на точность синхронизатора несущей и символов. Далее сигнал поступает на формирующий фильтр (ФФ) для исключения негативного влияния межсимвольной интерференции, а затем сигнал поступает на блок грубой частотной компенсации (ГРЧС). Данный блок корректирует частоту входного сигнала по грубой оценке смещения частоты. После того входной сигнал поступает на блок синхронизации символов, реализованный по схеме ФАПЧ по методу Гарднера [4], а далее – на блок синхронизации несущей, который компенсирует остаточный сдвиг частоты. Скомпенсированный сигнал поступает на блок кадровой синхронизации, где начало кадра определяется по известной преамбуле. После того как были определены границы кадра, он поступает на блок декодирования данных, где осуществляется демодуляция, дескремблирование, декодирование по методу Витерби [5]. Заключительным этапом является дешифрование.

Для подтверждения требуемых характеристик была осуществлена оценка чувствительности приемника с последующим пересчетом в эквивалентную максимальную дальность при фиксированной скорости передачи. Схема эксперимента приведена на рис. 4.



Рис. 4. Схема проведения эксперимента

Оценка чувствительности осуществлялась путем установки максимального коэффициента ослабления второго аттенуатора, при котором приемник входил в режим синхронизации. Это подтверждается совпадением принятого сообщения с отправленным. Значения ослаб-

ления на аттенуаторе фиксировались, если девять из десяти сообщений являлись правильными и приемник не выходил из режима синхронизации в течение 5 мин. Результат проверки для скоростей передачи данных 4 Мбит/с и 100 Кбит/с представлен в таблице.

Результат проверки

№ эксперимента	Центральная частота сигнала, МГц	Мощность излучения, дБм	Битовая скорость	Чувствительность приёмника, дБ	Эквивалентная дальность, км
1	915	15	4 Мбит/с	97,8	2
2	915	15	100 Кбит/с	113,2	12

Из таблицы видно, что при мощности излучения в 15 дБм и скорости передачи 4 Мбит/с эквивалентная дальность связи составляет 2 км, что удовлетворяет требуемые характеристики. При уменьшении скорости до 100 кбит/с максимальная дальность связи увеличивается до 12 км при условии обеспечения прямой радиовидимости приемника и передатчика. Для увеличения дальности необходима установка направленных антенн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сотем: USRP новое поколения SDR трансиверов [Электронный ресурс]. – URL: <https://sotemgroup.ru/solutions/usrp-novoye-pokoleniye-sdr-transiverov>, режим доступа: свободный (дата обращения: 02.02.2024).
2. Зайков Д.Д. Анализ методов криптографической защиты канала связи между беспилотным летательным аппаратом и наземным пунктом управления / Д.Д. Зайков, Г.А. Калашников // Шарыгинские чтения: матер. докл. V Международ. науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2023 (принято к печати).
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: учеб. пособие. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.
4. Зайков Д.Д. Декодер Витерби для системы связи БПЛА / Д.Д. Зайков, Г.А. Калашников // Шарыгинские чтения: материалы докл. V Международ. науч.-практ. конф. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2023 (принято к печати).
5. Марков И.В. Математические модели систем ФАПЧ: бакалаврская работа. – СПб.: СПбГУ, 2017. – 34 с.

УДК 004.42, 621.37

ОБЗОР СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПАКЕТОВ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА АФАР

К.Д. Зайков, аспирант каф. РТС ТУСУРА

*Научный руководитель А.С. Аникин, доцент. каф. РТС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kirill.d.zaikov@tusur.ru*

Активные фазированные антенные решётки разрабатываются на основе системных требований, которые влияют на тактико-техни-

ческие характеристики радиоэлектронных систем. Возможности современных средств моделирования антенных решёток ориентированы на определение коэффициента усиления, коэффициента направленного действия и других производных характеристик по диаграмме направленности. Рассмотрены возможности распространённых САПР с точки зрения автоматизированного определения и анализа системных параметров активных фазированных антенных решёток.

Ключевые слова: АФАР, САПР, системные параметры.

При разработке активных фазированных антенных решёток (АФАР) для радиоэлектронных систем могут учитываться следующие системные параметры:

- форма диаграммы направленности, включая ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков;
- поляризационные характеристики;
- диаграмма сканирования, включая сектор сканирования;
- эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) – произведение мощности радиочастотного сигнала, подводимого к антенной системе, на коэффициент усиления антенной системы [1];
- шумовая добротность – отношение коэффициента усиления антенной системы к эквивалентной шумовой температуре приемной системы.

Проектирование АФАР в настоящее время осуществляется с помощью различных специализированных пакетов программ: САПР электромагнитного моделирования (как правило для проектирования антенных систем) и САПР автоматизированного проектирования электронных устройств (радиотрактов) [2].

Целью настоящей работы является описание распространённых САПР в части автоматической оценки системных параметров.

В рамках обзора были рассмотрены САПР, которые условно разделим на следующие виды:

I. САПР моделирования полотна антенной решётки в первом приближении.

II. САПР электромагнитного моделирования полотна антенной решётки.

III. САПР электромагнитного моделирования полотна и радиотрактов АФАР.

Возможности САПР третьего вида обеспечивают моделирование АФАР, в то время как САПР первого и второго вида обеспечивают моделирование АФАР только в части антенного полотна.

При моделировании полотна антенной решётки в первом приближении в САПР применяются математические модели, которые основаны, как правило, на использовании множителя диаграммы

направленности (например, FAZAR, MatLab и др.). Модель полотна представляет собой совокупность антенных элементов, расположенных в узлах некоторой сетки. Для антенных элементов может быть задана одинаковая диаграмма направленности.

В процессе моделирования для каждого направления визирования с некоторым шагом по углу определяется уровень поля в дальней зоне с помощью множителя диаграммы. Таким образом, в результате моделирования могут быть автоматически определены такие системные параметры, как форма амплитудной диаграммы направленности, ширина главного лепестка и уровень боковых лепестков для различных вариантов построения полотна АФАР.

Ко второму виду САПР относятся специализированные пакеты программ с возможностью электромагнитного моделирования как антенных элементов, так и полотен антенных решёток (например, COMSOL, CST Studio Suite и др.). В процессе электромагнитного моделирования антенной решётки определяется поле в дальней зоне путём решения уравнений Максвелла в дискретном виде с применением численных методов (метод конечного интегрирования, метод интегральных уравнений и т.д.) для геометрической модели и материалов [3, 4].

Таким образом, в результате моделирования могут быть автоматически определены такие системные параметры, как форма амплитудной и фазовой диаграммы направленности, ширина главного лепестка и уровень боковых лепестков, а также поляризационные характеристики для различных вариантов построения полотна АФАР.

К третьему виду САПР относятся специализированные пакеты программ с автоматизированным проектированием электронных устройств и электромагнитным моделированием. Преобладающее большинство таких САПР являются зарубежными (например, Keysight ADS, Keysight SystemVue, Cadence AWR Design Environment), однако имеются и отечественные разработки [3]. Электромагнитное моделирование антенн и некоторых узлов радиотрактов (фильтры, делители и т.д.) выполняется в разных программных модулях, а полученные результаты моделирования могут быть совмещены для уточнения характеристик АФАР.

Результаты анализа САПР с точки зрения автоматического расчёта системных параметров представлены в таблице.

Анализ таблицы показывает, что в настоящее время отсутствуют САПР с автоматическим вычислением системных параметров АФАР с малым временем моделирования больших решёток.

Уровень автоматизации расчёта системных параметров в САПР

Системный параметр	САПР вида		
	1	2	3
Форма диаграммы направленности	А	А	А
Поляризационные характеристики излучения	О	А	А
Диаграмма сканирования	О	П	П
ЭИИМ	Р	Р	П
Шумовая добротность	Р	Р	П
Время моделирования	Низкое	Большое	Не известно

Примечание. А – автоматический расчёт в САПР; П – программируемый расчёт в САПР; Р – ручной расчёт по результатам моделирования САПР; О – отсутствует возможность расчёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения: Межгосударственный стандарт: дата введения 1982-01-01 / Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 61 с.

2. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению «Радиотехника» / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко и др.; под ред. Д.И. Воскресенского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2012. – 741 с.

3. Комплекс программ математического моделирования антенных систем с электронным управлением лучом / О.С. Алексеев, С.Е. Гаврилова, А.Н. Грибанов, А.И. Кузнецов, Г.Ф. Мосейчук, А.И. Синани // Антенны. – 2021. – № 5(273). – С. 16–26.

4. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов / А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Клюкин, М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 1. – С. 49–66.

УДК 537.877

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОСАДКОВ НА ИНТЕГРАЛЬНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, ТЕМПЕРАТУРУ И АБСОЛЮТНУЮ ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА В Г. НОВОСИБИРСКЕ

И.С. Гогодзе, лаборант НИЛ РН НИИ РТС ТУСУРА

Научный руководитель Ф.Н. Захаров, доцент каф. РТС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ilya.gogadze@yandex.ru

Представлен анализ влияния атмосферных осадков на изменение абсолютной влажности, температуры воздуха и интегрального влагосодержания. Результаты работы показали, что выпадение обильных осадков приходится на резкий спад параметров влажности атмосферы, что также согласуется с работами других исследователей.

Ключевые слова: абсолютная влажность, температура воздуха, интегральное влагосодержание, атмосферные осадки, сигналы ГНСС.

Обильные атмосферные осадки являются суровыми погодными явлениями, которые происходят по всему миру. Они могут оказывать разрушительное воздействие на отдельные регионы, приводя к гибели людей и уничтожению средств к существованию [1, 2]. Своевременное обнаружение таких осадков является важной задачей [2–4]. Существующая сеть метеорологических станций и метеорологических радиолокаторов не всегда позволяет оперативно и с высокой вероятностью обнаружить надвигающиеся атмосферные явления [5].

Поэтому повышение точности оперативного прогнозирования опасных атмосферных явлений является актуальной задачей современной метеорологии.

Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), проходя через атмосферу Земли, претерпевают искажения, которые зависят от состояния атмосферы. Используя информацию об этих искажениях (например, дополнительная задержка сигнала в тропосфере), можно оценить состояние атмосферы и получить дополнительные данные для повышения точности прогноза погоды [6]. Одним из параметров атмосферы, который можно оценить по тропосферной задержке навигационного сигнала, является интегральное влагосодержание.

Интегральное влагосодержание (IVW) – это количественная характеристика влаги, содержащейся в тропосферном столбе с площадью поперечного сечения один квадратный метр.

IVW определяется через «влажную» составляющую тропосферной задержки по следующей формуле [7]:

$$IVW = ZWD \cdot \left(0,10631 + \left(1732,83 \cdot T_m^{-1} \right) \right)^{-1},$$

где ZWD – «влажная» составляющая тропосферной задержки; $T_m = 50,4 + 0,789 \cdot T_s$ – средневзвешенная температура атмосферы [9]; T_s – приземное значение температуры, К.

ZWD определяется как разность полной тропосферной задержки, определяемой по навигационным сигналам, и гидростатической составляющей, вычисляемой по модели Саастамойнена [8].

Анализ интегрального содержания влаги в атмосфере является эффективным способом мониторинга опасных атмосферных явлений [10]. Исследования показали, что пик влагосодержания атмосферы приходится за несколько часов до начала грозы [10, 11].

Однако для получения наилучших результатов важно проанализировать влияние осадков на другие параметры тропосферы, такие как абсолютная влажность и температура воздуха.

В рамках данной работы были проанализированы временные зависимости IVW, температуры и абсолютной влажности воздуха в пе-

риод осадков и без них. В качестве исходных данных для анализа использовались данные новосибирских навигационной и метеорологической станций. Полученные значения представлены на рис. 1 и 2, где период осадков отражён затемнённой областью.

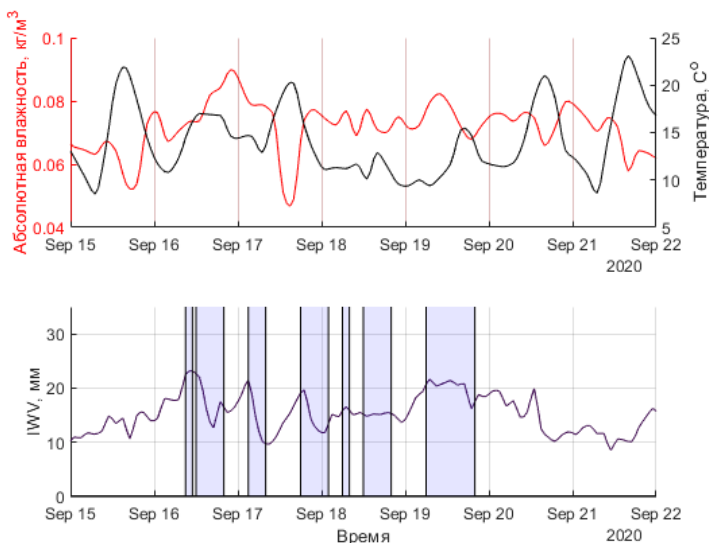


Рис. 1. График параметров тропосферы с периодами выпадения осадков в период с 15 по 22 сентября 2020 г.

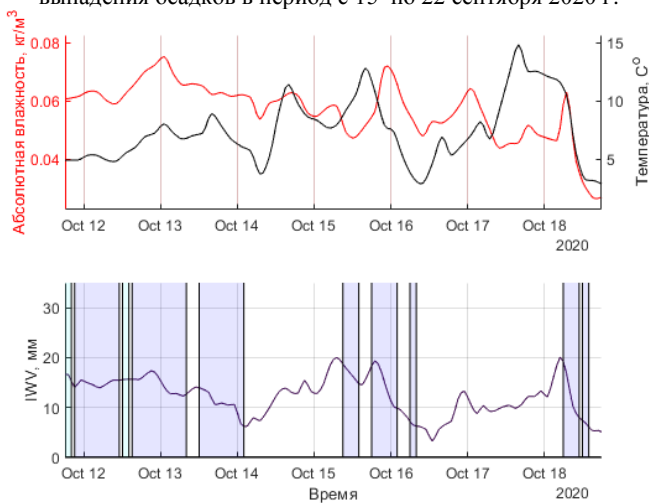


Рис. 2. График параметров тропосферы с периодами выпадения осадков в период с 12 по 19 октября 2020 г.

Исходя из графиков, можно утверждать, что перед выпадением обильных осадков за несколько часов значения температуры, влажности и IWV начинают возрастать, что особенно видно на графиках за 16–18 сентября и 13, 15, 18 октября. При этом данная особенность характерна не для всех случаев выпадения осадков. Так, за 19 сентября и 12–13 октября можно отметить рост абсолютной влажности и температуры во время выпадения осадков, при этом IWV находился примерно на одном уровне. Полученные данные в целом согласуются с работами [11, 12], в которых утверждается о положительной корреляции между осадками и снижением интегрального влагосодержания в других местностях с более высокой конвективной энергией атмосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Опасные природные явления и снижение риска бедствий [Электронный ресурс]: Интернет-портал Всемирной метеорологической организации. – URL: <https://public.wmo.int/ru/опасные-природные-явления-и-снижение-риска-бедствий>.
2. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды гидрометцентра России. – 2014. – № 351. – С. 51.
3. Кулиев Э.В. и др. Анализ рисков ливней и наводнений с помощью гибридного алгоритма PSO-SVR // Изв. высш. учеб. завед. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 1 (217). – С. 23–29.
4. Ivannikov D.A. Improving the effectiveness of monitoring of dangerous meteorological phenomena // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1991. – № 1. – P. 11.
5. Калинин Н.А. и др. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 3. – С. 43–59.
6. Кишкина А.К., Шестаков Н.В., Бугаец А.Н. Исследование изменения интегрального влагосодержания атмосферы на основе данных ГНСС-зондирования и перспективы его использования в региональных моделях прогнозирования погоды Приморского края // Наука. Технологии. Инновации. – 2020. – С. 122–126.
7. Калинин В.В. Восстановление интегрального влагосодержания атмосферы с помощью глобальных навигационных спутниковых систем: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань: Казан. фед. ун-т, 2013. – 121 с.
8. Saastamoinen J. Int. Symp. on the Use of Artificial Satellite // Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite. – Washington, 1971. – P. 247–251.
9. Клыков А.О. Зенитная тропосферная задержка сигналов ГЛОНАСС / GPS по спутниковым данным ATOVS / А.О. Клыков, В.Б. Кашкин // Решетневские чтения. – 2014. – № 18.

10. Guerova G. Thunderstorm classification functions based on instability indices and GNSS IWV for the Sofia Plain / G. Guerova, T. Dimitrova, S. Georgiev // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11. – № 24. – P. 2988.

11. Ramezani Ziarani M. et al. A model for the relationship between rainfall, GNSS-derived integrated water vapour, and CAPE in the Eastern Central Andes // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – № 18. – P. 3788.

12. Шестаков Н.В. и др. Исследование изменения интегрального влаго-содержания в тропосфере по данным ГНСС наблюдений в зоне перехода «Континент–Океан» (Приморский край, Дальний Восток России). // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18, № 5. – С. 266–276.

УДК 621.396.946

РАДИОВЫСОТОМЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСАДКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Е.Д. Морозов, М.Е. Ильясов, А.В. Зяблицев, студенты каф. РТС

г. Томск, ТУСУР

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

Описана реализация математической модели радиовысотомерной системы для обеспечения посадки первой ступени ракеты-носителя. Представлены аналитические выражения для расчёта высоты полёта.

Ключевые слова: радиовысотомерная система, координаты, высота полёта, уравнение плоскости.

Радиовысотомерная система применяется в составе системы управления первой ступени ракеты-носителя для обеспечения посадки на подготовленную площадку путём определения высоты над подстилающей поверхностью площадки в зоне посадки ступени в пределах заданной погрешности [1].

Радиовысотомерная система состоит из N приёмо-передающих антенн (N больше или равно 3), расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга по периметру ракеты. Каждая антенна излучает сигнал под заданным углом, который отражается и приобретает задержку по времени, по которой рассчитывается расстояние от антенны до точки отражения. Зная данное расстояние, можно рассчитать высоту полёта.

Задачей данного исследования является изучение принципов работы радиовысотомерной системы для дальнейшей реализации в виде лабораторного макета.

Методика расчёта высоты полёта. Схемы расположения антенн на плоскости и в пространстве изображены на рис. 1 и 2.

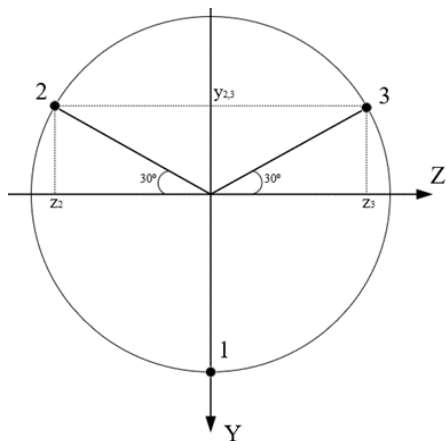


Рис. 1. Схема расположения антенн на плоскости

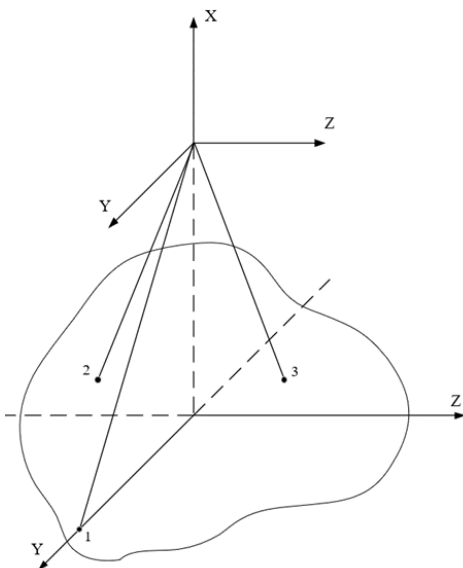


Рис. 2. Схема расположения антенн в пространстве

Каждая из антенн излучает сигнал под углом γ , длина луча h измеряется по задержке отражённого сигнала. Знание данных параметров позволяет рассчитать координаты точек отражения луча от земной поверхности в декартовой системе координат, начало которой расположено в центре поперечного сечения первой ступени на высоте рас-

положения антенн H_0 . Координаты точек для трёх антенн рассчитываются по формулам, полученными с помощью тригонометрических соотношений

$$x_{1,2,3} = -h * \cos(\gamma); \quad y_1 = h * \sin(\gamma); \quad z_1 = 0; \quad y_{2,3} = -y_1 * \sin(30^\circ);$$

$$z_2 = -y_1 * \cos(30^\circ); \quad z_3 = y_1 * \cos(30^\circ).$$

Точки отражения формируют плоскость, которая задаётся уравнением [2]

$$x - b * y - c * z - d = 0,$$

где b, c, d – коэффициенты, которые находятся при решении системы уравнений [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} b * \sum_{i=1}^N y_i^2 + c * \sum_{i=1}^N y_i * z_i + d * \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i * y_i = 0 \\ b * \sum_{i=1}^N y_i * z_i + c * \sum_{i=1}^N z_i^2 + d * \sum_{i=1}^N z_i - \sum_{i=1}^N x_i * z_i = 0 \\ b * \sum_{i=1}^N y_i + c * \sum_{i=1}^N z_i + d * N - \sum_{i=1}^N x_i = 0 \end{array} \right\}.$$

Рассчитав коэффициенты в уравнении плоскости, можно найти высоту полёта по формуле [2]

$$H = \frac{|d|}{\sqrt{1+b^2+c^2}} - H_0.$$

Данная математическая модель является идеализированной и может быть использована для дальнейших исследований зависимости погрешности измерения высоты полёта от различных параметров, таких как угол наклона ступени относительно поверхности, ширина диаграммы направленности и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы измерения параметров движения ВА СРВ МАВИ.300-Э0091. – УПКБ «Деталь», 2020. – 31 с.
2. Параметры излучаемого сигнала СРВ МАВИ.300-Э0091 ПЗ. – УПКБ «Деталь», 2020. – 19 с.

УДК 621.396.946

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРЕДОБРАБОТКИ БАЗЫ ДАННЫХ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ
ПРИ ПОМОЩИ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОСЕТИ
НА ПРИМЕРЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ТРАСС
ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ**

*М.Е. Ильясов, Е.Д. Морозов, А.В. Зяблицев, студенты каф. РТС
Научный руководитель В.И. Вебер, ассистент каф. РТС
г. Томск, ТУСУР*

Описана реализация метода предобработки базы радиолокационных данных, повысившего качество классификации трасс воздушных объектов при помощи нейросети. Представлено сравнение различных способов обработки базы данных.

Ключевые слова: база данных, обработка, признак, парсинг, python, нейросеть, EDA, способ, обучение.

В настоящее время одним из перспективных направлений развития радиолокационных систем (РЛС) является использование технологий искусственного интеллекта, предоставляющего компьютерной системе возможность обучаться и получать решение задач, которые ранее считались неразрешимыми без участия человека. Однако любая нейросеть не обходится без базы данных для её обучения. Кроме того, база данных должна быть определённым образом обработана, чтобы результаты обучения были максимальны [1].

Задачей данного исследования является повышение эффективности классификации трасс при помощи нейронной сети с помощью разработки метода предобработки базы данных. Метод обработки должен содержать совокупность методов, которые улучшают показатели точности нейросети. Результатом данной работы будет являться зафиксированное снижение вероятностей ложной тревоги и пропуска цели.

Исходная база данных. Для выполнения данной разработки, используется база данных, содержащая информацию о показателях радиолокационных трасс. К этим показателям относятся: время, координаты, мгновенные значения векторов скорости, класс объекта (ложная или действительная цель).

Методы обработки базы данных. В ходе разработки метода предобработки базы данных были применены методы обработки, которые используются в разведочном анализе данных (EDA) [2].

Приведено краткое описание этих методов:

1. Добавление новых признаков. Так как изначальная база данных содержит только информацию о времени, координатах и их характеристиках, результаты классификации нейросети являются недостаточными. В качестве новых признаков, основываясь на имеющихся данных, были выбраны: тангаж, курс, путевая скорость.

2. Увеличение количества признаков. Так как изначальная база данных содержит 7 весомых признаков, было решено использовать их все, добавив также 3 новых признака, рассчитанных ранее.

3. Искусственное увеличение количества ложных трасс в базе данных. Так как в изначальной базе данных ложных трасс было мало, было решено увеличить их количество в 2 раза. Для этого значения параметров ложных трасс были изменены с разбросом в 30 %, и добавлены в исходную БД. Данный метод был применён в совокупности со всеми методами предобработки.

4. Новый метод парсинга данных. Первый парсер объединял строки по 10 и шёл последовательно. Новый же парсер, помимо того, что также объединяет 10 строк изначальной БД в одну, идёт последовательно не по каждому 10 строкам, а по каждой строке, тем самым увеличивая выборку в 10 раз, что должно благотворно повлиять на результаты обучения. Данный метод было решено использовать в совокупности со всеми ранее используемыми.

Сравнение результатов разных видов обработки. В данном разделе будут приведены сравнения графиков, а также значений вероятностей ложной тревоги и пропуска цели.

Значения вероятностей ложной тревоги и пропуска цели для различных видов обработки приведены в таблице.

Значения вероятностей ложной тревоги и пропуска цели

Вид предобработки	Значение ложной тревоги	Значение вероятности пропуска цели
Исходная БД	0,01820	0,00633
1 и 3	0,24528	0,00828
2 и 3	0,01127	0,00735
4 и 3	0,00534	0,00254

В качестве графической интерпретации результата приведем финальный метод обработки данных, а именно 4 и 3. Результат изображен на рис. 1.

На данном графике точками обозначены графики обучения нейросети на обучающей выборке. В свою очередь, график, изображенный линией, – результаты обучения нейросети на тестовой выборке.

ке. Приведён график точности обучения (левый) и график численного значения ошибки (правый).

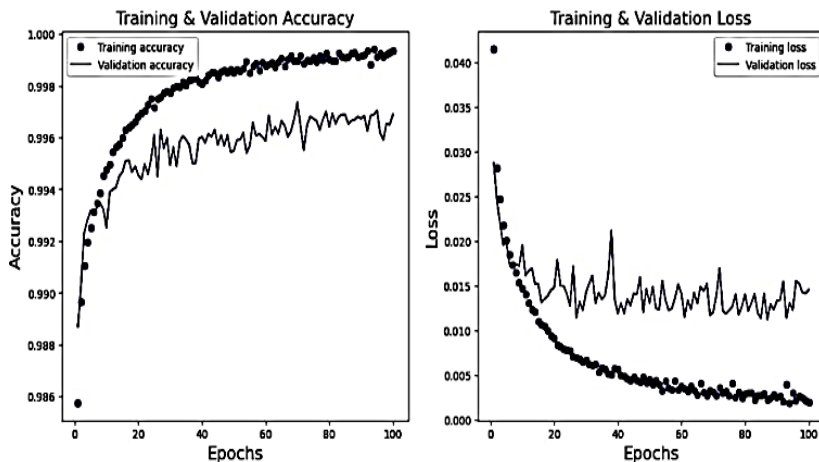


Рис. 1. Графическое сравнение результатов предобработки базы данных

Подводя результаты, можно отметить, что методы предобработки не дают должного результата по отдельности. Проблема переобучения (неправильного обучения нейросети, повлекшего невозможность адекватного принятия решения нейросетью) являлась главной на протяжении всего исследования. Решить в достаточной мере эту проблему помогли новый парсер данных и добавление ложных трасс воздушных объектов. Итогом данной работы стало увеличение точности работы нейросети, что можно заметить по кривым точности обучения и ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Этапы разработки баз данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uchet-jkh.ru/i/etapy-razrabotki-baz-dannyyh>
2. Разведочный анализ (EDA) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/752434>.
3. Плас Дж. Вандер. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. – М.: Питер, 2018. – 576 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Председатель – Озёркин Д.В., декан РКФ, к.т.н.;
зам. председателя – Понамарев Д.Е., преп. каф. КИПР

УДК 533.9.07

РАЗРАБОТКА И ЗАПУСК СИСТЕМЫ ВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ

А.С. Назаров, магистрант каф. КИПР, инженер ЛППИП
Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ИСЭ СО РАН snnzrv@gmail.com

Разработано и реализовано техническое решение для конструкции системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки, необходимое для запуска источника электронных пучков, позволяющего модифицировать поверхность конструкционных материалов, используемых для изготовления космической аппаратуры.

Ключевые слова: система вакуумной откачки, электронно-пучковая установка, источник электронных пучков, модификация поверхности, космическая аппаратура.

Источник электронных пучков – это устройство, которое позволяет генерировать пучок электронов с заданной энергией и заданной формы.

Как правило, источник электронных пучков состоит из катода, модулятора, ускоряющего электрода и от одного до нескольких анодов. За первым анодом закрепляется термин «фокусирующий электрод» в том случае, если анодов больше одного.

Благодаря высоким скоростям нагрева (до 10^9 К/с) и охлаждения (до 10^7 К/с) в поверхностном слое могут происходить такие структурно-фазовые превращения, которые не могут быть реализованы в стационарном режиме (например, формирование неравновесных поверхностных сплавов в системах «плёнка–подложка»), измельчение кристаллической структуры металлов и сплавов). Перечисленные эффекты позволяют улучшить многие функциональные свойства обрабатываемых изделий: коррозионную стойкость, износостойкость режущего инструмента, узлов трения и штампов, усталостную прочность, а так-

же повысить электрическую прочность вакуумной изоляции в различных высоковольтных устройствах и генераторах мощного СВЧ-излучения [1].

Работа источника электронных пучков возможна при низком давлении, а конкретно $P = 10^{-2}$ Па и ниже. Необходимость низкого давления состоит в том, что при низком давлении пучок электронов не рассеивается в процессе транспортировки при столкновении с атомами и молекулами атмосферных газов. Учитывая вышеизложенные особенности, была выполнена разработка технического решения для конструкции системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка технического решения для конструкции системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки.

Для достижения поставленной цели проводится решение таких задач, как:

- 1) разработка технического решения в форме полномасштабного макета системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки;
- 2) запуск и испытание системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки;
- 3) получение давления внутри вакуумной камеры ниже 2×10^{-3} Па.

Разработка системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки. Важными составляющими системы вакуумной откачки являются турбомолекулярный насос и форвакуумный насос. В ходе проектирования были выбраны такие насосы, как ТМН-500 – турбомолекулярный насос отечественного производства и TRP-90 – форвакуумный насос китайского производства, поскольку данные модели удовлетворяли поставленным задачам.

Результаты разработки системы вакуумной откачки приведены на рис. 1. На основе 3D-модели (рис. 1, а) был проведен предварительный расчёт системы вакуумной откачки и построен график зависимости давления внутри вакуумной камеры от времени (рис. 1, б).

Процесс сборки полномасштабного макета системы вакуумной откачки обладал следующими особенностями: для герметичного соединения насосов с вакуумной камерой использовалась вакуумная арматура из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Весь вакуумный тракт, состоящий из вакуумной арматуры, должен был быть максимально герметичным. Соединение фланцев производилось согласно стандарту ISO/KF. Для того чтобы избежать натекания атмосферных газов в вакуумный тракт и вакуумную камеру, использовались метал-

личные прижимные и центрирующие кольца, а также резиновые уплотнительные кольца. Также для большей герметизации соединения фланцев использовались радиальные хомуты, обеспечивавшие равномерное сжатие уплотнительных колец. Радиальный хомут располагался между фланцами KF с внешней стороны вакуумной арматуры, с одной стороны половинки хомута закреплялись на оси, а с другой стороны стягивались с помощью винтового механизма, что позволяло притянуть фланцы друг к другу и сжать уплотнительное кольцо. Прежде чем монтировать каждый из элементов соединения, необходимо было обработать их ацетоном, чтобы избежать загрязнений резиновых уплотнителей, вследствие которых система вакуумной откачки могла стать негерметичной, либо вовсе выйти из строя.

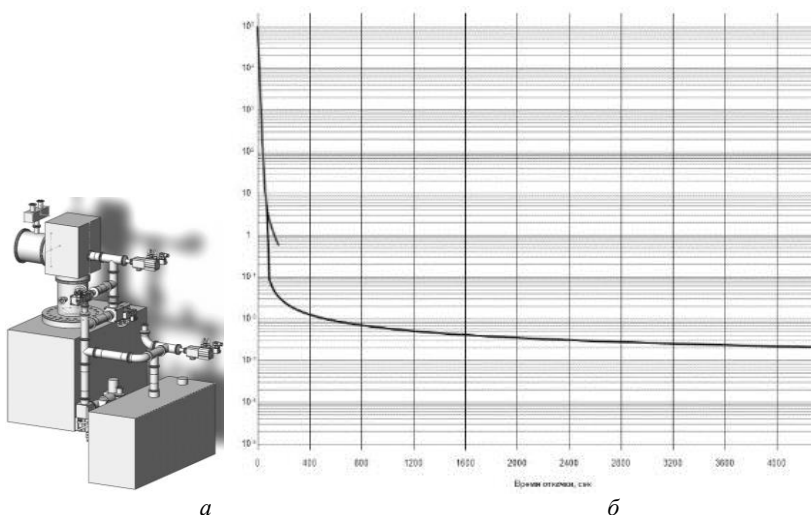


Рис. 1. Система вакуумной откачки: *а* – 3D-модель; *б* – зависимость давления внутри вакуумной камеры от времени

Для управления системой вакуумной откачки использовались 5 угловых пневматических клапанов марки Kovach Vacuum и угловой пневматический затвор того же производителя. Для поддержания давления (от 4 до 6 бар), требуемого для работы пневматических приводов клапанов, использовался компрессор марки Patriot.

Для измерения давления в вакуумной камере использовался вакуумметр МЕРАДАТ-ВИТ 19ИТ2 с преобразователем манометрическим термопарным (ПМТ-6-3) и вакуумметр АИВ-51 (на основе преобразователя манометрического ионизационного – ПМИ-51).

В ходе первичных испытаний было получено не только требуемое давление внутри вакуумной камеры, но и значение лучше требуемого. Минимальное достигнутое давление при откачке вакуумной камеры равнялось $1,3 \times 10^{-3}$ Па (рис. 2), что вполне согласуется с проведёнными предварительными расчётами.

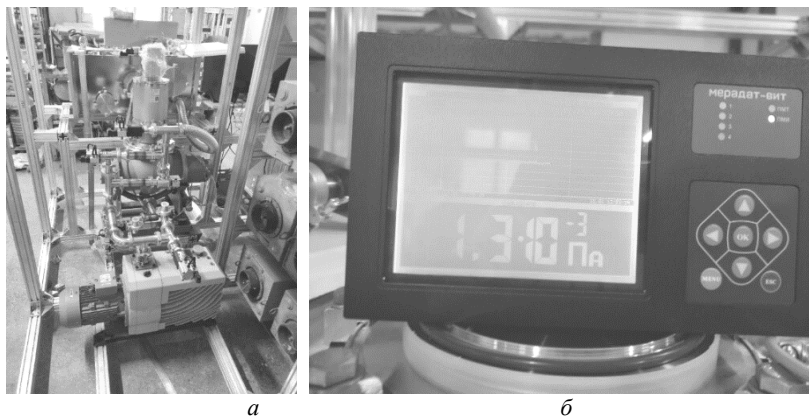


Рис. 2. Система вакуумной откачки: *а* – фото процесса сборки; *б* – фото вакуумметра МЕРАДАТ-ВИТ 19ИТ2 с показателем давления $1,3 \times 10^{-3}$ Па

Заключение. В результате выполненных работ был разработан, изготовлен и запущен полномасштабный макет системы вакуумной откачки электронно-пучковой установки. В ходе первичных испытаний было достигнуто давление внутри вакуумной камеры $1,3 \times 10^{-3}$ Па, что полностью удовлетворяет поставленной цели. Результаты теоретических, экспериментальных исследований и практических разработок внедрены в ФГБУН ИСЭ СО РАН (г. Томск).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кизириди П.П. Управление параметрами низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в пушках со взрывозмиссионным катодом: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2021. – 143 с.

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ СЕРИИ
1564 РАЗЛИЧНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ**

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ

Е.В. Виноградова, ассистент; Н.С. Размахов, В.Ш. Рахимов,

М.А. Юдин, аспиранты каф. ЭПБС

Научный руководитель В.П. Крылов, проф. каф. ЭПБС, д.т.н.

г. Владимир, ВлГУ, tikhonravova.elizaveta@mail.ru

В результате исследований с использованием метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) при температуре +31 °С были получены параметры релаксации ёмкости интегральных схем (ИС) 1564ЛЕ1 производителя № 1 – «Завод Протон» (г. Москва) и производителя № 2 – «Экситон» (г. Павловский Посад). После обработки параметров релаксации ёмкости были получены частотные сканы образцов, результаты анализа которых согласуются с результатами измерений электрических параметров ИС на автоматизированной универсальной контрольно-измерительной системе: «FORMULA 2К».

Ключевые слова: релаксационная спектроскопия глубоких уровней, потенциальный дефект, частотный скан.

На сегодняшний день проблема обеспечения качества полупроводниковых компонентов является весьма актуальной. Производители электронных средств находятся в достаточно непростых условиях, поскольку высокая потребность в полупроводниковых ИС вынуждает их наращивать темп производства и сокращать время разработки электронной компонентной базы. Нередко, чтобы удовлетворить этим требованиям, производителю приходится жертвовать качеством компонентов. Используемые на производстве методы функционального и операционного контроля полупроводниковой электронной компонентной базы в достаточной мере не обеспечивают требуемую надежность и срок службы изделий. Испытания по отбраковке полупроводниковых компонентов, в частности, электротермотренировка (ЭТТ), требуют достаточно высоких затрат электроэнергии, использования крупного стендового оборудования и занимают длительное время. В связи с этим все больше внимания уделяется созданию новых альтернативных диагностических методов отбраковки потенциально ненадежных изделий, требующих гораздо меньше экономических затрат [1].

Одним из таких методов может стать метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), использование которого позволяет контролировать наличие и параметры электрически активных ловушек глубоких центров в объеме полупроводника (примеси и

дефекты кристаллической решётки), а также ловушек на границе раздела сред Si/SiO₂. Ряд механизмов отказов (например, инжекция горячих носителей заряда) зависит от плотности поверхностных состояний на границах раздела сред Si/SiO₂ [2].

Задачей работы является анализ частотных сканов образцов ИС 1564ЛЕ1 различных производителей, полученных с использованием метода РСГУ, и сравнение результатов анализа с результатами измерений электрических параметров ИС, полученных на тестере «FORMULA 2K».

В ходе работы были получены параметры релаксации ёмкости 3 образцов интегральных схем (ИС) 1564ЛЕ1 производителя № 1 и 3 образцов ИС производителя № 2. В результате обработки параметров релаксации ёмкости были получены частотные сканы образцов производителя № 1 (рис. 1) и образцов производителя № 2 (рис. 2) [3].

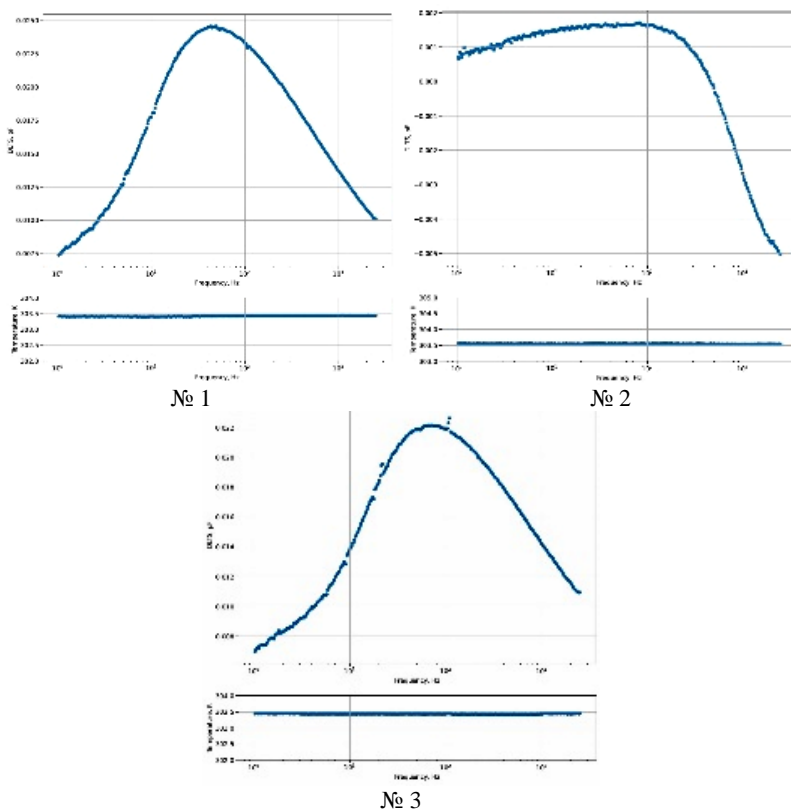
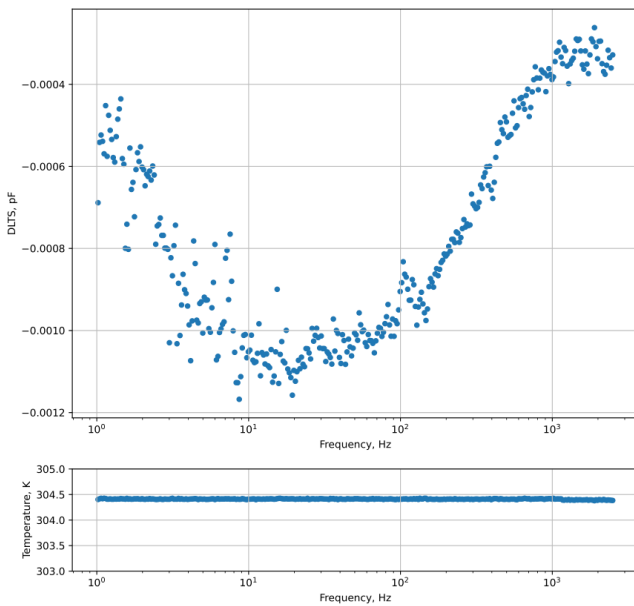
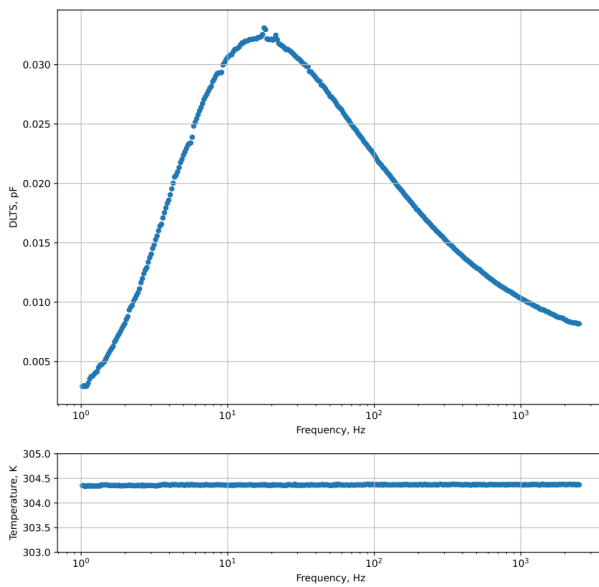


Рис. 1. Частотные сканы № 1, № 2 и № 3 образцов производителя № 1

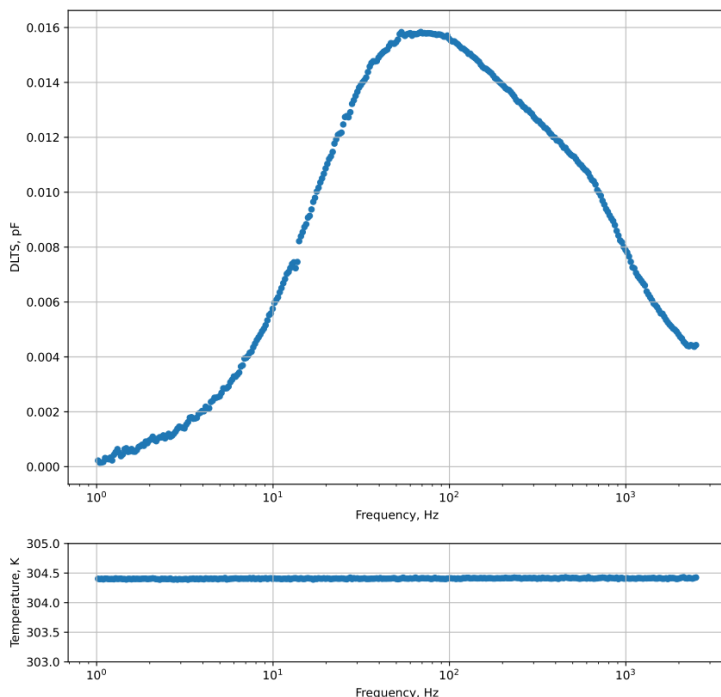


№ 2



№ 7

Рис. 2 (начало)



№ 11

Рис. 2. (окончание). Частотный скан образца производителя № 2

Частотный скан образца № 2 производителя № 1, содержащий отрицательный пик релаксационного сигнала, отличается от частотных сканов других образцов № 1 и № 3, содержащих положительные пики. Частотный скан образца № 2 производителя № 2 содержит отрицательный пик релаксационного сигнала и отличается от частотных сканов других образцов № 7 и № 11, содержащих положительные пики.

После оценки частотных сканов образцов были проведены тестовые измерения электрических параметров ИС на универсальной контрольно-измерительной системе для функционального и параметрического контроля «FORMULA 2K». При тестировании образцов № 1 и № 3 производителя № 1 и образцов № 7 и № 11 производителя № 2 на тестере было обнаружено, что параметры токопотребления приближаются к верхней границе допустимых значений по техническим условиям (ТУ), что говорит о потенциальной ненадежности данных образцов ИС серии 1564. Полученные отчеты о проведенных измерениях согласуются с результатами оценки образцов методом РСГУ. В

результате анализа качества ИС 1564ЛЕ1 различных производителей с использованием совокупности методов оценки оказалось, что большинство тестируемых образцов являются потенциально ненадежными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов М.И. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Сергеев; под науч. ред. М.И. Горлова. – 3-е изд., доп. и перераб. – Ульяновск: УлГТУ, 2020. – 470 с.

2. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors // J. of Applied Physics. – 1974. – Vol. 45, No. 7. – P. 3023–3032.

3. Крылов В.П. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы / В.П. Крылов, А.М. Богачев, Т.Ю. Пронин // Радиопромышленность. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 35–44.

УДК 53.091

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ БЛОКОВ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

И.Е. Тарханов, студент

*Научный руководитель А.А. Чернышев, доцент каф. КИПР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР*

Представлены результаты модального анализа, который был проведен в САД-системе SolidWorks Simulation. Произведен расчет времени изготовления несущей конструкции на магниевом основании, состоящем из решетчатой структуры.

Ключевые слова: технологичность, прессование, модальный анализ, конструкция.

Обеспечение технологичности бортовой космической аппаратуры (БКА) является актуальной задачей, так как от технологичности зависит сокращение времени и затрат на производство, повышение надежности, облегчение модернизации, а также улучшение функциональности создаваемых блоков.

Один из способов повышения технологичности блоков БКА – использование блоков с ребрами жесткости или специальными выступами различных форм и размеров для создания более устойчивой конструкции.

При моделировании были рассмотрены два конструктивных решения в основании блока БКА: со сплошным дном и с решетчатой

силовой структурой. Для детали со сплошным дном печатные платы (ПП) прессуются к основанию, а для решетчатой структуры ПП размещаются с помощью винтового крепления к несущему основанию.

Целью данной работы является определение целесообразности использования решетчатой структуры в блоках БКА и расчет времени производства при использовании данной структуры.

На примере конструкции основания стабилизатора напряжения, изготавливаемого на предприятии «АО «НПЦ «Полюс» из магниевого сплава МА211 со сплошным дном, был произведен модальный анализ для изучения вибраций и колебаний, которые возникают при нагрузках на космических аппаратах (КА). В качестве сравнения результатов было выбрано такое же основание, конструктивно отличающееся исполнением с использованием ребер жесткости.

В табл. 1 представлены результаты модального анализа двух вариантов основания, выполненного в программном обеспечении SolidWorks Simulation.

Таблица 1

Результаты модального анализа

Вид основания	Частота, Гц
Основание со сплошным дном	227,16
Основание с решетчатой структурой	466,55

Для расчета времени изготовления несущей конструкции на магнeвом основании была использована CAD-система для подготовки производства в области машиностроения и металлообработки, в том числе и операции, выполняемые на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) ADEM 9.0. Результаты вычислений каждой стороны основания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета времени изготовления, мин

Стороны обработки	Основание со сплошным дном	Основание с решетчатой структурой
Верхняя сторона	68	47
Боковая левая сторона	5	5
Боковая правая сторона	10	10
Боковая верхняя сторона	7	7
Боковая нижняя сторона	15	10
Нижняя сторона	56	49
Всего	161	128

Операция по прессованию ПП к основанию со сплошным дном занимает определенное количество времени, которое зависит от типа

используемого оборудования, размера платы, типа клея и желаемой степени адгезии. При использовании стандартного оборудования для прессования ПП время прессования составляет 10–15 мин при температуре 150 °С.

Однако это время может значительно варьироваться в зависимости от конкретных условий по типу использования более современного оборудования или более высокой температуры, время запрессовки можно сократить. С другой стороны, использование низкой температуры или старого оборудования может увеличить время прессования. Также стоит учесть, что требуется некоторое время на охлаждения и затвердевания клея, которое может занять несколько минут или часов, в зависимости от условий эксплуатации.

В табл. 3 представлены операции по прессованию ПП к основанию со сплошным дном и затраченное время на предприятии «АО «НПЦ «Полус».

Таблица 3

Операции по прессованию ПП к основанию со сплошным дном и затраченное время

Операции прессования ПП к основанию	Время, мин
Создание пресс-формы	60
Очистка поверхности, нанесение клея, установка платы на основание	9
Установка пресс-формы, предварительный нагрев плиты пресса	15
Давление первой ступени прессования	6
Давление второй ступени прессования	8
Давление третьей ступени прессования	10
Давление четвертой ступени прессования	12
Охлаждение и затвердевание клея	60
Всего	180

По результатам модального анализа видно, что при использовании основания с решетчатой структурой собственная частота конструкции возросла, что привело к увеличению жесткости конструкции. Также время изготовления при фрезеровании снизилось на 33 мин, что позволит быстрее изготавливать данный вариант конструкции. Исключая метод прессования, можно повысить скорость изготовления блоков БКА, сократить затраты на материалы и зарплаты сотрудникам.

Таким образом, предложенные конструктивные решения позволяют сохранить требуемую прочность конструкции, снизить время изготовления одной единицы изделия и тем самым повысить технологичность блоков БКА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гормаков А.Н. Конструирование и технология электронных устройств приборов: учеб. пособие / А.Н. Гормаков, Н.А. Воронина. –Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 164 с.

УДК 621.37

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПРИЁМНОЙ ЧАСТИ PLC-МОДЕМА С ДВУХЧАСТОТНОЙ FSK-МОДУЛЯЦИЕЙ

И.А. Жучков, Д.А. Гордеева, студенты

Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 410

г. Москва, МАИ, zhuchkov.vanya@gmail.com

Наличие мультипликативных помех в сетях электропитания приводит к некорректной работе существующего аналогового демодулятора двухчастотных радиоимпульсов. В данной работе рассматривается вопрос разработки цифрового фильтра для приёмной части PLC-модема на базе ЦСП с возможностью гибкого программирования части принятия решения. В результате исследований был синтезирован нерекурсивный фильтр с использованием прямоугольного окна и проведены испытания в среде Matlab Simulink.

Ключевые слова: цифровой фильтр, мультипликативные помехи, PLC-модем, FSK-модуляция.

Исследуемый PLC-модем использует в своей работе двухчастотные радиоимпульсы согласно таблице.

Частоты импульсов FSK

Нижняя группа частот, Гц	Верхняя группа частот, Гц
58 367	60 697
58 523	60 770
58 664	60 852
58 791	60 941

В процессе распространения сигнала в сети питания возникают комбинационные частоты, которые мешают корректной работе аналогового демодулятора МТ8870. Для решения этой проблемы предлагается использовать приёмный модуль на основе ЦСП. Для детектирования составляющих импульса необходимо синтезировать 8 цифровых фильтров. Полоса пропускания такого цифрового фильтра должна не превышать удвоенную наименьшую разность двух соседних частот, используемых в модеме, т.е. 146 Гц.

Для синтеза цифрового фильтра с требуемыми параметрами был выбран метод дискретизации импульсной характеристики. Так как

скорость спада частотной характеристики являлась приоритетным параметром, то в качестве аналогового прототипа был выбран идеальный прямоугольный фильтр с полосой пропускания 70 Гц. Его импульсная характеристика представляет собой кардинальный синус. Перенос частотной характеристики на выделяемую частоту эквивалентен умножению на косинус соответствующей частоты. Конечная формула выглядит следующим образом:

$$h[n] = \frac{\sin(\pi \cdot n \cdot \frac{1}{F} \cdot 70)}{\pi \cdot n \cdot \frac{1}{F} \cdot 70} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{1}{F} \cdot f),$$

где F – частота дискретизации, f – фильтруемая частота.

По данной математической модели была построена модель в среде Matlab Simulink. Схемы отдельных частей модели приведены на рис. 1, 2.

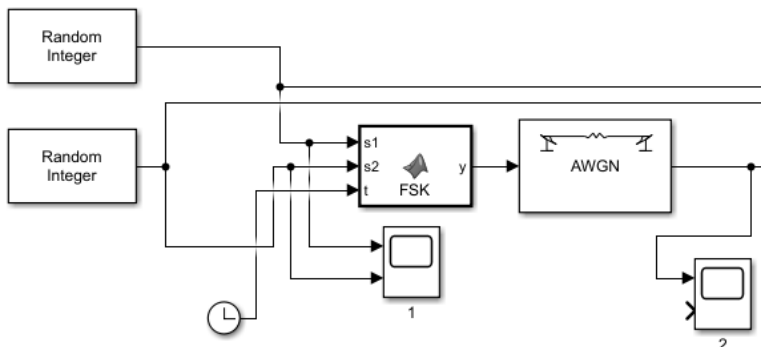


Рис. 1. Схема модели Simulink, формирующая входной сигнал

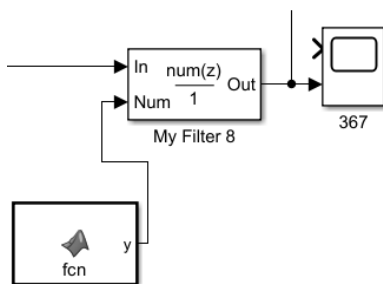


Рис. 2. Схема модели Simulink одного дискретного фильтра

При частоте дискретизации в 250 кГц необходимое число отсчётов в обработке фильтра составляет 801, что означает, что минималь-

ными требованиями к ЦСП является объём памяти 12,5 кбайт для хранения коэффициентов и необходимых отсчётов входного сигнала, при условии, что один отсчёт кодируется одним байтом. Для получения одного отсчёта выходного сигнала требуется совершить 801 операцию умножения с накоплением, что означает, что частота ЦСП должна быть минимум в 801 раз выше частоты АЦП для реализации одного цифрового фильтра. Осциллограммы сигналов, приближенных к реальным условиям с помощью добавления аддитивного белого шума, приведены на рис. 3 и 4.

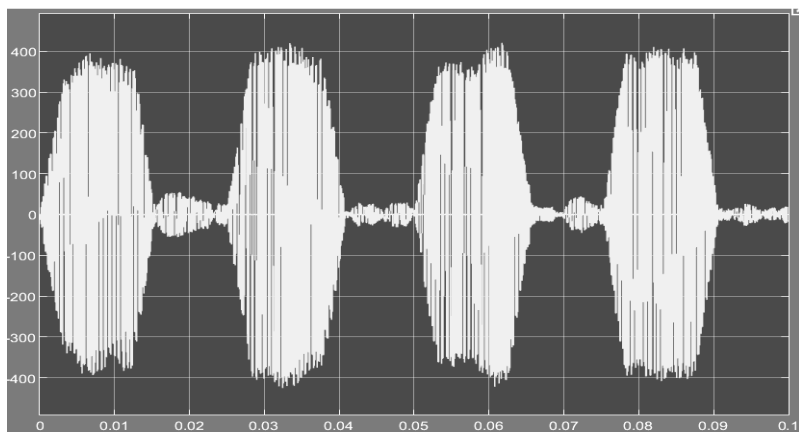


Рис. 3. Осциллограмма радиоимпульсов, содержащих гармонического колебания резонансную частоту, на выходе цифрового фильтра

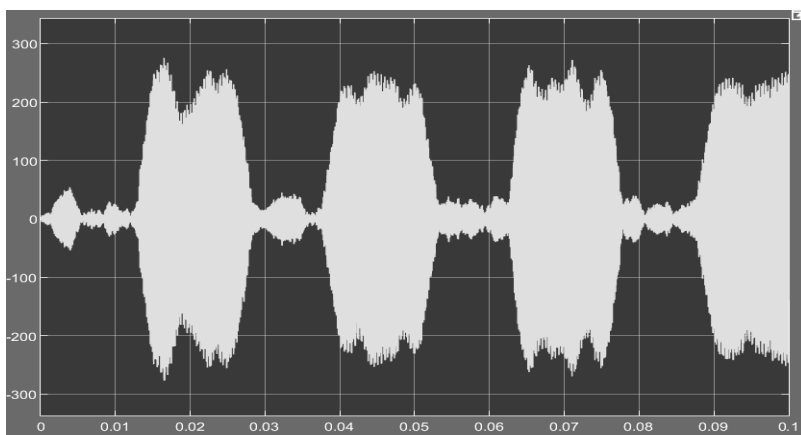


Рис. 4. Осциллограмма радиоимпульсов, не содержащих гармонического колебания резонансной частоты, на выходе цифрового фильтра

По результатам моделирования очевидно, что выбранная реализация многоканального фильтра может быть альтернативой применяемому в текущем варианте модема аналоговому решению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
2. Терехин В.В. Моделирование в системе MATLAB: учеб. пособие. – Новокузнецк: Кемер. гос. ун-т., Кузбассвуиздат, 2004. – 312 с.
3. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: в 2 ч. – Ч. 2: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 360 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.3

РАДИОТЕХНИКА

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

УДК 629.051

МЕТОД ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАЗНОСТИ ФАЗ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

*С.В. Шафран, м.н.с. НИЛ «Перспективные фундаментальные и
прикладные космические исследования на базе наноспутников»;*

*М.А. Советкина, инженер каф. наноинженерии
г. Самара, Самарский университет, sovetkinam@mail.ru*

Одной из задач навигации является определение направления движения (курса) транспортного средства. Традиционно с этой целью используется магнитный компас, однако определяемое с его помощью направление имеет существенную погрешность, связанную с указанием магнитной стрелки на магнитный полюс, отстоящий от географического на значительное расстояние. Эта ошибка тем существеннее, чем выше широта.

С развитием спутниковой навигации координаты объекта и, следовательно, азимут возможно определять с высокой точностью, но определение курса по-прежнему требует точного определения ориентации, т.е. направления на Северный или Южный полюс планеты. Для определения направления на географический полюс можно использовать средства спутниковой навигации, для чего требуется технология фазовых измерений [1].

Ключевые слова: спутниковая навигация, фазовые измерения.

Фазовые измерения предполагают определение разности фаз навигационных сигналов, принимаемых двумя или более антеннами приёмника, при этом, располагая информацией о точном положении навигационного спутника, можно определить направление на него и далее на географический полюс. При работе с несколькими спутниками можно также определить углы крена и тангажа. Фазовые измерения с i -й антенны навигационного приёмника и навигационного спутника k в размерности расстояния формируются, как описано в [1]:

$$\Phi_i^k = \rho_i^k + cdt_i - cdt^k - I_i^k + T_i^k + \lambda N_i^k - \epsilon_i^k,$$

где Φ^{k_i} – фазовые измерения, ρ^{k_i} – расстояние между приёмником и спутником, c – скорость света, dt_i и dt^k – ошибка часов приёмника и спутника соответственно, I^{k_i} – задержка сигнала в ионосфере, T^{k_i} – задержка сигнала в тропосфере, λ – длина волны навигационного сигнала, N^{k_i} – целое число длин волн между спутником и приёмником (фазовая неоднозначность), ε^{k_i} – прочие ошибки.

Координаты антенны j обозначим как x_j , координаты спутника – x^i , тогда фазовые измерения для спутника i и антенны j получим следующим образом:

$$\Phi_j^i = \phi_j^i + 2\pi N_j^i = \frac{2\pi}{\lambda} \|x^i - x_j\|,$$

где $\phi \in [0 \dots 2\pi)$.

Разностные измерения для двух антенн можно записать как

$$\Phi_{12}^i = \frac{2\pi}{\lambda} (\|x^i - x_1\| - \|x^i - x_2\|) = \phi_{12}^i + 2\pi N_{12}^i.$$

Наиболее распространённым методом получения разностных фазовых измерений является применение двух независимых навигационных приемников с последующим вычитанием показаний [2]. В таком случае приемники не синхронизированы между собой и моменты получения фазовых измерений могут отличаться, из-за чего требуется дополнительная коррекция измерений. Кроме того, задача определения моментов пропуска фазы осложняется тем, что каждый приемник может пропустить целый оборот фазы в произвольный момент времени, что осложняет детектирование [2].

В структурную схему навигационного приёмника, как правило, входит модуль слежения, функцией которого является поддержание частоты и фазы локального генератора дальномерного кода и несущей в соответствии с параметрами принимаемого сигнала [3].

Прямое измерение разности фаз базируется на работе двух модулей слежения навигационного приёмника, один из которых (ведущий) работает стандартно, подстраивая частоту локального генератора таким образом, чтобы минимизировать метрику $\tan Q/I$, где I, Q – синфазная и квадратурная составляющие соответственно. Аналогичным образом обеспечивается поддержание нужной фазы генератора дальномерного кода [2, 4, 5]. Полученные частоты используются для подстройки соответствующих генераторов второго (ведомого) модуля слежения, на вход которого поступает сигнал со второй антенны (сдвинутый по фазе относительно сигнала ведущего модуля). В этом случае вышеприведенная формула позволит получить искомую величину сдвига фазы (разности фаз между сигналами на входе ведущего модуля и ведомого (рис. 1).

Определённым недостатком предлагаемого алгоритма является тот факт, что ведомый модуль работает в режиме с отклонением от синхронизма, т.е. при значительной разности фаз и низком уровне соотношения сигнал/шум возможен выход из режима слежения с потерей синхронизма. Тем не менее моделирование и практические эксперименты показывают, что устойчивое слежение наблюдается при сдвиге фаз вплоть до абсолютных значений 75–80 градусов. Если дополнить схему дополнительным каналом измерения (третьей антенной), то возможно получить устойчивые измерения во всем практически интересующем диапазоне сдвигов фазы.

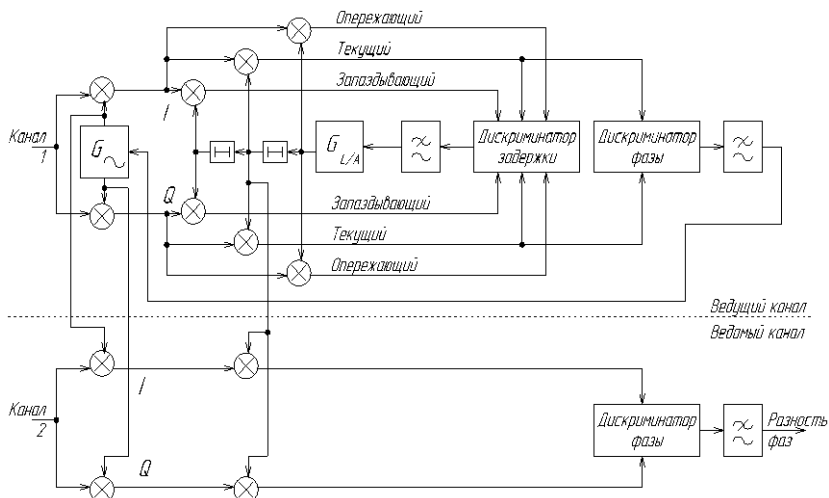


Рис. 1. Структурная схема приемника с прямым измерением разности фаз

Результаты измерений сдвига фазы при сигнале с уровнем C/N_0 порядка 35 дБ-Гц указаны в таблице.

Результаты моделирования измерений сдвига фазы

Интервал, мс	СКО разности фаз, градусы		
	Без усреднения	Окно 10	Окно 100
1	26,81	9,48	3,05
2	17,56	6,52	2,15
5	15,53	3,94	1,26
10	13,80	3,03	0,87

Поскольку структура модуля слежения не зависит от используемой навигационной системы, а различается лишь структурой генера-

тора дальномерного кода, предложенный метод работоспособен для любых глобальных спутниковых навигационных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. GNSS spoofing detection using two-antenna differential carrier phase / M.L. Psiaki, B.W. O'Hanlon, S.P. Powell, J.A. Bhatti, K.D. Wesson, T.E. Humphreys // Radionavigation Laboratory Conference Proceedings. – 2014. – P. 1–25.
2. Kiam J.J. Lowcost GPSbased Compass with Reliable Ambiguity Resolution and Cycle Slip Correction. – М.: Technische Universität München, 2013. – 190 p.
3. Tsui J.B. Fundamentals of Global Positioning System Receivers. – 2nd ed. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 372 p.
4. Borre K. Algorithms for Global Positioning / K. Borre, G. Strang. – Wellesley Cambridge Press, 2012. – 452 p.
5. A Software Defined GPS and Galileo Receiver. A Single Frequency Approach // K. Borre, D.M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, S.H. Jensen. – Berlin: Birkhäuser, 2006. – 190 p.

УДК 621.376.4

РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЧАСТИ СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BPSK-МОДУЛЯЦИИ В GNU RADIO

*Д.В. Ленкова, Г.А. Таразанов, Н.Н. Раульев, магистранты каф. РСС
Научный руководитель А.А. Трубачев, доцент каф. РСС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, dash.lenkova2015@yandex.ru*

Построена модель системы передающей части, которая использовалась в модели системы связи с приемной частью и каналом связи на основе BPSK-модуляции в GNU Radio.

Ключевые слова: система связи, BPSK-модуляция, передача сигнала, GNU Radio.

Моделирование позволяет решать проблемы реального мира и является удобным инструментом для исследования. В данной работе рассматривается создание модели системы связи, подробно разберем процесс создания модели канала передачи на основе BPSK-модуляции в среде GNU Radio.

GNU Radio – программный инструментарий, предоставляющий разработчикам программно-определяемых радиосистем «строительные блоки», обеспечивающие основные функции цифровой обработки сигналов [1].

Передача данных – это процесс передачи информации от одного узла к другому в коммуникационной системе. В целом передача данных играет фундаментальную роль в современных коммуникацион-

ных системах и обеспечивает эффективную связь и обмен информацией между различными устройствами и системами [2].

Для реализации передающей части модели необходимо сгенерировать поток битов и промоделировать его в сложное созвездие. Блок Constellation Modulator, настраиваемый с помощью блока Constellation Object, ожидает упакованные байты, для чего необходим блок Random Source – генератор случайных чисел, предоставляющий байты со значениями от 0 до 255. Получаем, что входной сигнал на блоке Constellation Modulator представляет собой поток байтов, а выходной сигнал – комплексный модулированный сигнал в основной полосе частот.

Decimating FIR Filter выполняет роль фильтра приподнятого косинуса при помощи функции, которая прописана в параметрах блока. Параметр Decimation равен единице, что означает отсутствие децимации сигнала. Фильтр приподнятого косинуса ограничивает полосу пропускания передачи, чтобы сигнал находился в пределах желаемой полосы пропускания. Недостатком фильтра является создание межсимвольной интерференции, которая вредна для принимаемого сигнала, потому что происходит наложение символов друг на друга в приемной части [3].

На рис. 1 представлены графики спектра до и после фильтрации.

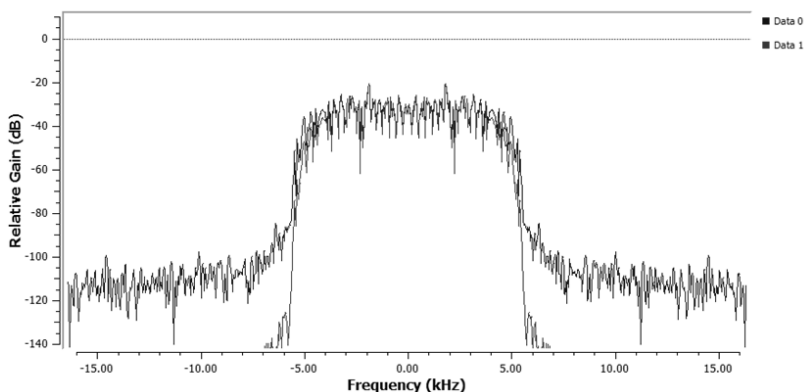


Рис. 1. Спектр сигнала до и после фильтрации

Теперь рассмотрим влияние канала и то, как сигнал искажается между моментом его передачи и моментом, когда мы видим сигнал в приемнике. Первым шагом является добавление модели канала, что делается с использованием блока Chanel Model – имитатора модели

канала, который можно использовать для оценки, проектирования и тестирования различных сигналов.

На рис. 2 и 3 представлены графики спектра, IQ-диаграмма после прохождения через канал передачи.

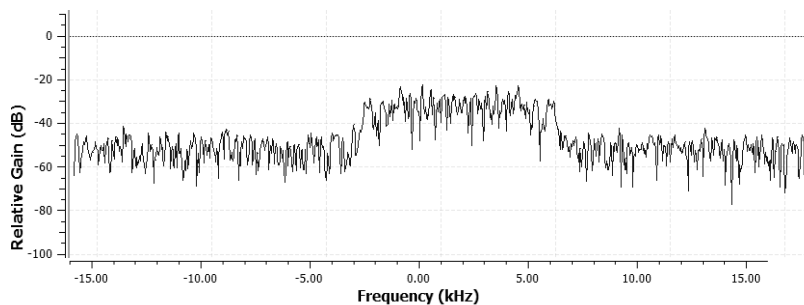


Рис. 2. Спектр сигнала после прохождения через канал передачи

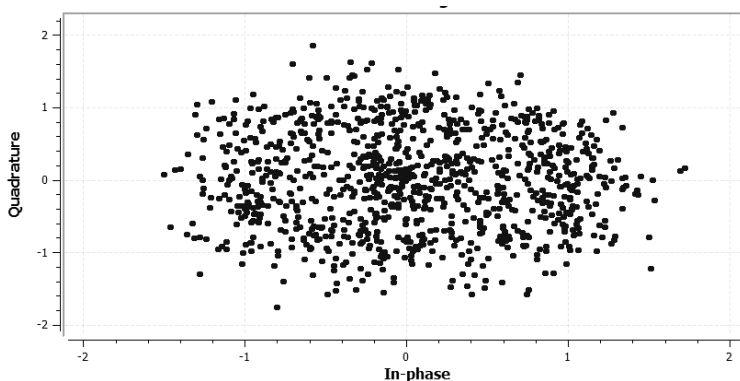


Рис. 3. IQ-диаграмма после прохождения через канал передачи

Структура модели канала передачи BPSK-модуляции в GNU Radio представлена на рис. 4.

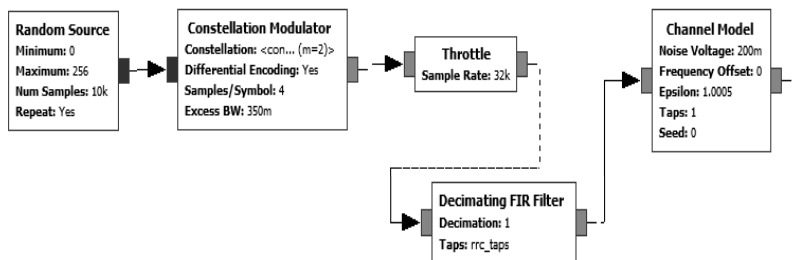


Рис. 4. Модель канала передачи BPSK-модуляции

Таким образом, в рамках исследования создана модель канала передачи на основе BPSK-модуляции, которая эффективно сработала для передачи информации через радиоканал. Эта модель позволяет преобразовывать цифровые данные в соответствующие модулированные сигналы и передавать их по радиоканалу с использованием модуляции BPSK.

ЛИТЕРАТУРА

1. GNU Radio [Электронный ресурс]: офиц. сайт GNU Radio. – URL: <https://www.gnuradio.org/> (дата обращения: 17.12.2023).
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр.: пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Костин М.С. Архитектурно-конфигурируемые SDR-технологии радиомониторинга и телеметрии: учеб. пособие / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 148 с.

УДК 621.376.4

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ QPSK-МОДУЛЯЦИИ

А.Р. Зобов, В.В. Бричковский, студенты каф. РСС

*Научный руководитель А.С. Задорин, проф. каф. РСС, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, 4545as60@mail.ru, Brichkovskiy.vitya@bk.ru*

Предложена программно-аппаратная модель контура синхронизации несущей частоты сигнала с цифровой модуляцией типа QPSK на платформе MatLab-Simulink.

Ключевые слова: цифровая QPSK-модуляция, синхронизация, демодуляция, фазовые ошибки, MatLab-Simulink.

Известен способ синхронизации несущей частоты радиосигнала с цифровой модуляцией, основанный на использовании цикла синхронизации для генерации локальных синусоидальных и косинусоидальных волн с той же частотой и фазой, что и принятый сигнал несущей, с последующим умножением на принятый сигнал, для демодуляции синфазной и квадратурной фаз требуется контур обратной связи для измерения фазовой погрешности и формирования сигнала ошибки генератора с числовым программным управлением (NCO) с квадратурными синусоидальными и косинусоидальными выходами [1, 2].

Целью данной работы является исследование на программной платформе MatLab Simulink альтернативного метода, ориентирован-

ного на принятие решения, в котором передаваемые символы данных неизвестны [1, 2]. Фазовая ошибка в данном случае генерируется на основе выбора символа, т.е. символа, наиболее близкого к принятой выборке. Особенностью метода является отсутствие сведений о передаваемых символах. В этих условиях используется метод, основанный на принятии решения [2].

Это означает, что даже после синхронизации несущей в кодовом созвездии все еще может наблюдаться остаточный сдвиг фазы, который необходимо будет компенсировать на более позднем этапе обработки синхросигнала в цифровом приемнике.

Архитектура приемника такого типа приведена на рис. 1.

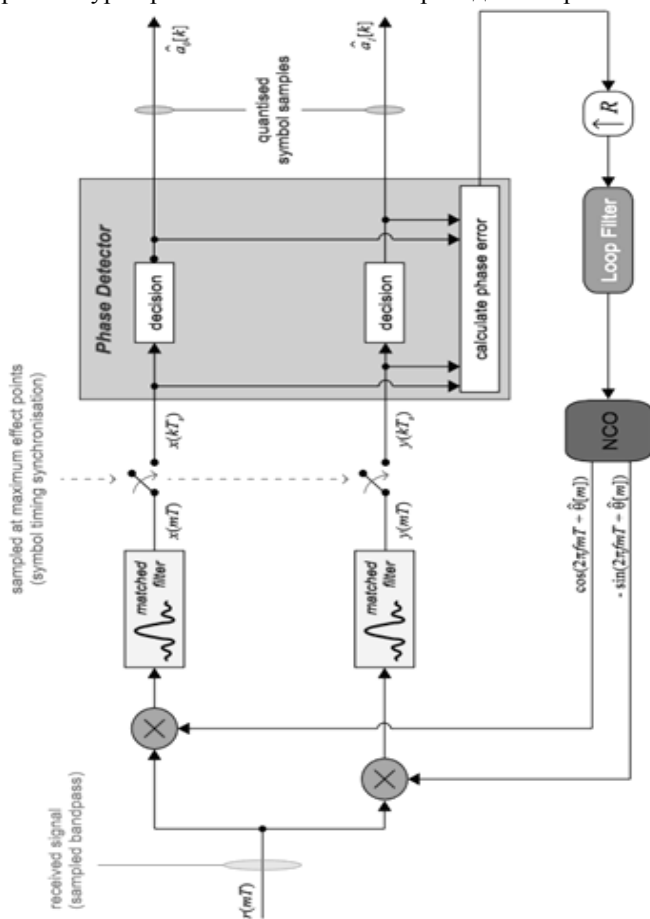


Рис. 1. Синхронизация несущей (синхронизация на этапе демодуляции)

С помощью ПО MatLab Simulink была собрана схема, моделирующая контур синхронизации несущей, показанный на рис. 1. Контур синхронизации управляет частотой и фазой компонентов квадратурной синусоидальной волны, которые демодулируют принимаемый сигнал в основной полосе частот.

Процесс синхронизации диаграммы-созвездия представлен на рис. 2. В начале цикла созвездие движется цифровое созвездие QPSK-модуляции размыто вследствие отсутствия захвата синхронизации (см. рис. 2, а). Затем, после завершения цикла, синхронизация диаграмма созвездия стабилизируется и сходится к классическому виду (см. рис. 2, б).

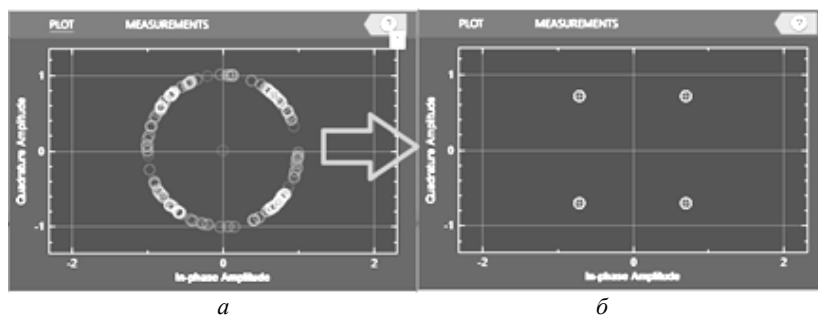


Рис. 2. Процесс синхронизации несущей частоты

Полученные нами данные показывают, что предложенная MatLab Simulink-модель синхронизации несущей частоты радиосигнала с QPSK-модуляцией, ориентированная на принятие решения, может быть использована в учебном процессе в ходе практических занятий и лабораторного практикума для исследования устойчивости различных режимов систем синхронизации цифровых линий связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Томаси У. Электронные системы связи. – М.: Техносфера, 2007. – 1360 с.
2. Software Defined Radio using MATLAB® & Simulink® and the RTL-SDR / R.W. Stewart, K.W. Barlee, D.S.W. Atkinson, L.H. Crockett // Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde Glasgow, Scotland, UK, 1st Edition, 2015. – 674 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

УДК 004.932.2

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ДВИЖЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЕРАЦИИ

С.Е. Бояркин, магистрант каф. ТУ;

*К.Р. Мусакаева, ассистент каф. госпитальной хирургии,
врач-торакальный хирург клиники БашГМУ*

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР; г. Уфа, БашГМУ, boyarkin-stepan@mail.ru*

На сегодняшний день развитие роботизированной хирургии приводит к необходимости отслеживания и идентификации объектов в каждом кадре видеоматериала с записью проведения операции. Отслеживание или трекинг медицинских инструментов, далее в работе называемых «ретракторами» с числовым идентификационным номером, требуется для определения шаблона действий при проведении операции, оценки степени профессионализма врача-хирурга, проводившего операцию, и, что является наиболее важным, для перспективы развития автоматизированной системы обработки медицинской видеоинформации.

Ключевые слова: трекинг, отслеживание объекта, построение траектории движения, обработка изображений.

Цель трекинга объектов заключается в создании траектории объекта во времени путем определения его местоположения в каждом кадре видеоряда. Применение видеоаналитических систем позволяет уменьшить необходимость присутствия оператора, что, в свою очередь, сокращает влияние человеческого фактора, улучшает скорость реагирования на чрезвычайные ситуации и обеспечивает своевременное обнаружение угроз. Более того, такая система способна обрабатывать больший объем поступающих данных в реальном времени, а не обрабатывать его уже после события [1–3].

Для проведения исследования использовалась среда разработки PyCharm. Исследование основано на применении алгоритма отслежи-

вания multiSURF, основанного на построении траектории движения по опорным точкам. MultiSURF является улучшением алгоритма SURF, способным обнаруживать двух- и трех-сторонние взаимодействия и определять окружение, ориентированное на целевой экземпляр.

Принцип работы используемого алгоритма заключается в отслеживании изменения положения опорных точек в каждом последующем кадре и, таким образом, построении карты движения объекта. В случае если наблюдаемый объект пропадет из видимой части сцены, используется компенсация «потери» объекта с помощью добавления вручную дополнительных ключевых кадров с дополнительными опорными точками. Тогда при новом появлении объекта в видимой части сцены алгоритм «подхватывает» предмет наблюдения и далее прорабатывает карту его движения.

Область интереса составляют три ретрактора на сцене проведения медицинской операции, первый кадр видеоряда которой показан на рис. 1.

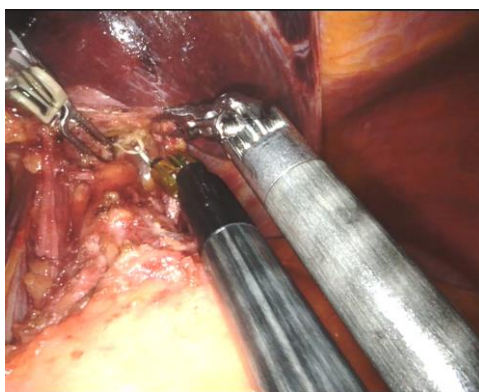


Рис. 1. Первый кадр видеоряда с хирургической операцией

На рис. 2 представлен пример работы алгоритма и построенная карта движения, прорисованная зеленой линией, для ретрактора 1.

Далее на рис. 3 представлено движение эллипсовидной рамки по карте движения ретрактора 1 в трех точках таймлайна видеоряда. Точкой таймлайна именуется положение объекта наблюдения в видеопотоке, описываемое временным указателем в формате 00ч00м00с000мс. Эллипсовидная рамка выбрана ввиду вытянутости наблюдаемых объектов и для сужения области обнаружения. Трекинг осуществляется на основе того, что ограничивающей рамке присваивается ранее построенная карта движения.

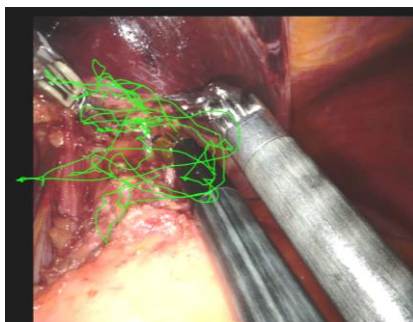


Рис. 2. Карта движения ретрактора 1

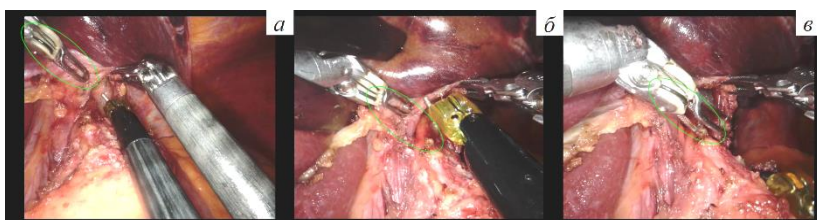


Рис. 3. Трекинг ретрактора 1: *а* – 00с140мс, *б* – 02с030мс, *в* – 54с220мс

Также построены карты движений для других двух ретракторов. Трекинг ретрактора 2 представлен на рис. 4, трекинг ретрактора 3 – на рис. 5.

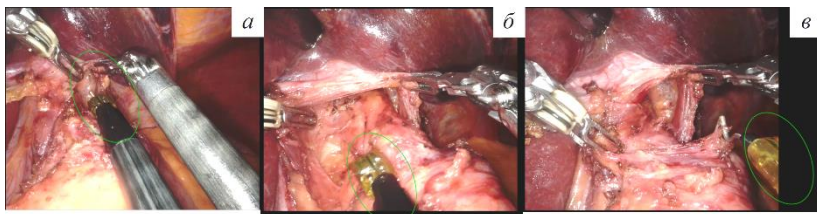


Рис. 4. Трекинг ретрактора 2: *а* – 02с130мс, *б* – 33с110мс, *в* – 59с420мс

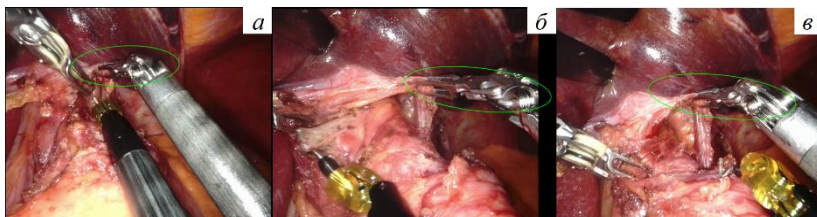


Рис. 5. Трекинг ретрактора 3: *а* – 02с120мс, *б* – 33с430мс, *в* – 59с570мс

Из анализа полученных результатов следует, что требуется доработка ограничивающих рамок в плане их увеличения в случае приближения камеры или уменьшения в случае её удаления.

Заключение. Построены три карты движения для каждого из ректоров на видеоряде. Осуществлен поиск и трекинг области интереса в каждом кадре всего видеоматериала. Компенсация потери объекта из кадра осуществлена путем добавления дополнительных ключевых кадров и сужения области обнаружения. Требуется доработка в виде автоматической идентификации и автоматизированного подбора размера ограничивающей рамки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Delforouzi A. New approaches for object tracking and image-based quality control: дис. – Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Universität Siegen, 2020. – 148 с.
2. Stoll M. Entwicklung eines kamerabasierten Inside-Out Objekt-Tracking-Systems auf basis reflektiver Marker für VR-Brillen. – Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2024. – 121 p.
3. Hensel S. Design and Implementation of a Camera-Based Tracking System for MAV Using Deep Learning Algorithms / S. Hensel, M.B. Marinov, R. Panter // Computation. – 2023. – Vol. 11, No. 12. – P. 244.

УДК 004.89

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.К. Ерболат, магистрант каф. ИТБ

*Научный руководитель А.З. Бигалиева, и.о. доцента каф. ИТБ, PhD
г. Караганда, Казахстан, НАО «Карагандинский технический
университет им. Абылкаса Сагинова», a.bigaliev@kstu.kz*

Рассмотрены алгоритмы машинного обучения для обработки изображений. Дано определение сверточной нейронной сети и описана ее архитектура. Описаны подходы с использованием нейронных сетей для задач обнаружения объектов.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, распознавание изображений, субдискретизация.

Для работы с распознаванием и обработкой изображений используется сверточная нейронная сеть (CNN). Такой тип искусственной нейронной сети является основой для оптимального решения задач компьютерного зрения при разделении изображений на сегменты.

Архитектура CNN строится по следующему алгоритму.

На первом шаге в ограниченную область входа нейрона подается входной сигнал изображения. На заданный шаг происходит смещение области вправо и передача входа следующему нейрону. Так происходит работа со всем изображением. Нейроны разделены на группы, в которых весовые коэффициенты равны.

Для создания следующей группы нейронов, имеющих другой набор весовых коэффициентов, происходит повторное сканирование. Данный шаг повторяется до тех пор, пока не сформируется первый скрытый слой нейронов CNN (рис. 1).

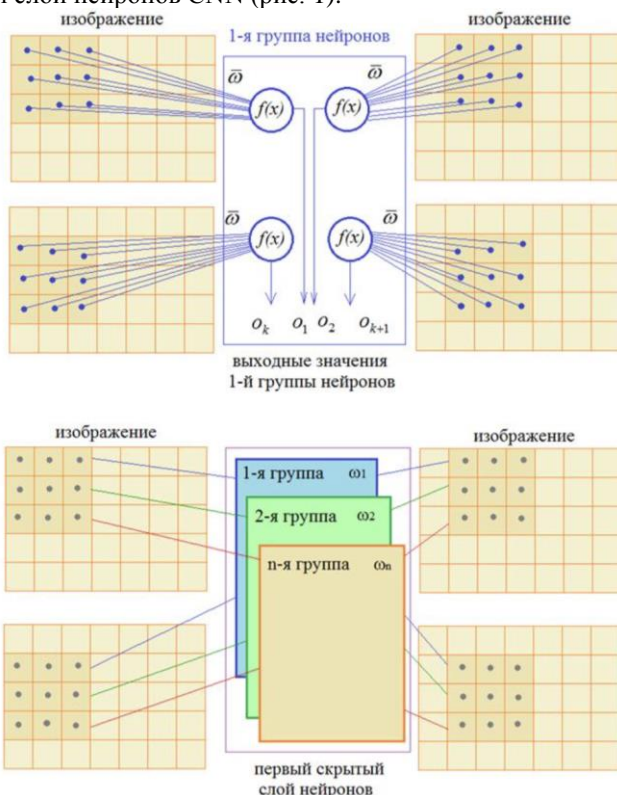


Рис. 1. Создание первого скрытого слоя нейронов сверточной нейронной сети

Значение пикселя изображения и число, ему соответствующее, умножаются между собой. Так происходит работа с каждым окном изображения. В результате получаем операцию свертки, в которой все произведения суммируются. Данную операцию можно описать следующей формулой:

$$v_{k,m} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 x_{i+k,j+m} \omega_{ij} + \omega_0, \quad k, m = 0, 1, 2, \dots,$$

где $x_{i+k,j+m}$ – значения пикселей изображения; $v_{k,m}$ – выходной сигнал для определенного положения окна на изображении; ω_{ij} – весовые коэффициенты (фильтр или ядро свертки); ω_0 – параметр смещения (bias).

В результате весовые коэффициенты остаются неизменными при перемещении окна, и для определенной группы нейронов появляются настраиваемые параметры, которые определяют возможность восприятия различных входных данных, а также характеризуют модель по сложности.

Факт того, что весовые коэффициенты постоянны для каждой группы внутри, позволяет выделить различные текстурные элементы на разных уровнях изображения. Это данные необходимы в дальнейшем для обработки, анализа и распознавания сложных схем и образов.

С целью сокращения сложности вычислений и числа параметров в сети выполняют операцию субдискретизации (рис. 2).

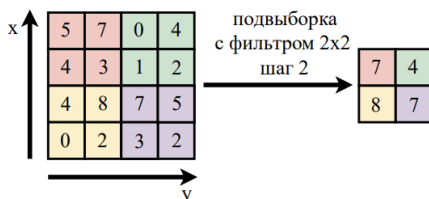


Рис. 2. Процесс уменьшения пространственного разрешения карт признаков

Полносвязная нейронная сеть, в свою очередь, может состоять из нескольких слоев. CNN-слои объединяются, и происходит передача слоев сверточной на полносвязную нейронную сеть, т.е. происходит переход к более абстрактным схемам.

На текущий момент используются двухуровневые методы и одноэтапные алгоритмы в решении задач обнаружения объектов указанных классов. Двухуровневые методы рассматривают изображение, как отдельные кадры, повышая тем самым точность распознавания, но при этом недостаточно производительны по скорости. R-CNN, FastR-CNN и FasterR-CNN являются представителями такой архитектуры. Одноэтапные алгоритмы, в свою очередь, основаны на методах регрессии и рассматривают изображение как единое целое. При этом скорость распознавания выше, но более низкая точность. К такому виду относятся различные версии YOLO.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулмагамбетова Ж.К. Разработка алгоритма распознавания казахско-латинского алфавита на изображении / Ж.К. Кулмагамбетова, Д.Т. Мұрзагұлов, А.З. Бигалиева // Научно-технический журнал «Университетінің еңбектері – Труды университета». – Караганда: НАО «Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова», 2023. – № 4. – С. 420–427.
2. Montessori-based Design of Long-term Child-Robot Interaction for Alphabet Learning / N. Oralbayeva, A. Amirova, Zh. Telisheva, A. Zhanatkyzy, A. Aymysheva, A. Sandygulova // ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. – 2023. – P. 691–695.

УДК 621.397.4

КОДИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И СТРОБИРОВАНИЯ В АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

*А.К. Мовчан, В.В. Капустин, доценты каф. ТУ, к.т.н.;
И.Д. Мусихин, магистрант; А.А. Тисленко, аспирант
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, mr.movchann@mail.ru*

Рассмотрено использование псевдослучайных кодовых последовательностей Баркера для формирования сигнала подсвета пространства и сигнала стробирования фотоприемника в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

Ключевые слова: активная зона видения, моделирование, последовательность Баркера, обработка изображений.

Активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС) являются подклассом оптико-электронных приборов наблюдения, использующих активный импульсный метод наблюдения пространства. Традиционно основным применением АИ ТИС являются обнаружение, наблюдение и измерение основных параметров объектов интереса, а также построение их трехмерных визуализаций, в том числе в рассеивающих средах (туман, дым и т.д.) [1].

За счет импульсного метода наблюдения, включающего в себя импульсный подсвет пространства короткими импульсами в инфракрасном диапазоне, а также стробирования с определенной задержкой фотоприемника формируется определенная область видения в пространстве, называемая активной зоной видения (АЗВ).

Традиционно в качестве импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприемника в таких системах используются импульсы прямоугольной формы (видеоимпульсы) определенной длительности, определяющей глубину АЗВ [2]. При равенстве длительно-

стей управляющих импульсов АИ ТИС представляет собой согласованный оптический приемник, а форма АЗВ приобретает треугольную форму с единственным максимумом энергии принимаемого с расстояния соответствующего задержке импульса стробирования фотоприемника относительно импульса подсвета. Однако треугольная форма АЗВ особенно при значительных длительностях управляющих импульсов (100–200 нс) не всегда является оптимальной для наблюдения в рассеивающих средах.

По причине высокого уровня помехи обратного рассеяния значительно снижается контраст изображения объекта наблюдения. Поэтому в АИ ТИС актуальна задача сокращения глубины АЗВ при сохранении ее максимальной энергии в области объекта наблюдения.

Из теории радиолокации известен способ повышения разрешающей способности, однозначности и потенциальной точности измерения дальности за счет фазовой манипуляции зондирующего сигнала псевдослучайными двоичными кодовыми последовательностями [3].

Данная манипуляция зондирующего сигнала приводит к значительному расширению его спектра, что в совокупности с согласованным (корреляционным) приемом приводит к значительному сокращению ширины главного лепестка корреляционной функции по сравнению с немодулированным радиоимпульсом такой же длительности. При этом известно, что корреляционная функция фазоманипулированного сигнала полностью определяется автокорреляционной функцией двоичной последовательности, в соответствии с которой производится манипуляция [4].

Двоичные последовательности, используемые в радиолокации, позволяют получить предельно низкий уровень боковых лепестков в автокорреляционной функции и носят название кодов Баркера или Баркеровских последовательностей. Уровень боковых лепестков автокорреляционной функции кодов Баркера не превышает величины $1/N$, где N – длина последовательности. Известны коды Баркера для следующих размерностей N : 3; 4; 5; 7; 11; 13. При этом в радиолокации, как правило, используют биполярные коды, т.е. коды с чередованием «1» и «–1», что при фазовой манипуляции соответствует чередованию фазы парциальных радиоимпульсов 0 для кода «1» и π для кода «–1».

АИ ТИС по своему принципу работы является оптическим локатором, основанным на согласованном приеме оптических сигналов, имеющих форму видеоимпульсов. Поэтому представляет интерес применение псевдослучайных кодовых последовательностей для формирования сигнала подсвета пространства и сигнала стробирования фотоприемника в АИ ТИС. Для этого предлагается каждый оди-

ночный импульс излучения подсвета и импульс стробирования фотоприёмника заменить на серию коротких псевдослучайных импульсов, составляя, таким образом, кодовую комбинацию, по которой происходит излучение оптического сигнала источником подсвета и прием отраженного сигнала фотоприемным устройством. При этом реализовать биполярный код для оптического излучателя и фотоприемника при используемом в АИ ТИС амплитудным приеме не представляется возможным, так как невозможно получение отрицательных значений амплитуды для оптического сигнала подсвета и сигнала стробирования фотоприёмника. Поэтому первым этапом проводилось моделирование с использованием неполярных кодов, при которых код «1» соответствует включенному подсвету и открытому фотоприёмнику, а код «0» соответствует их выключенному состоянию.

Моделирование АЗВ производилось путем вычисления свертки кодовых последовательностей Баркера для $N = 7$ и кода «1110010». При этом длительность парциальных импульсов в коде составляла 10 нс, а задержка стробирования была выбрана равной 100 нс.

На рис. 1, *а* показан результат моделирования АЗВ для неполярного кода Баркера-7 и для сравнения приведена АЗВ на основе видеоимпульсов длительностью 70 нс (пунктир). Также для сравнения на рис. 1, *б* представлена АЗВ на основе импульсной последовательности типа меандр «1010101». Графики нормированы к максимуму АЗВ на основе управляющих прямоугольных видеоимпульсов.

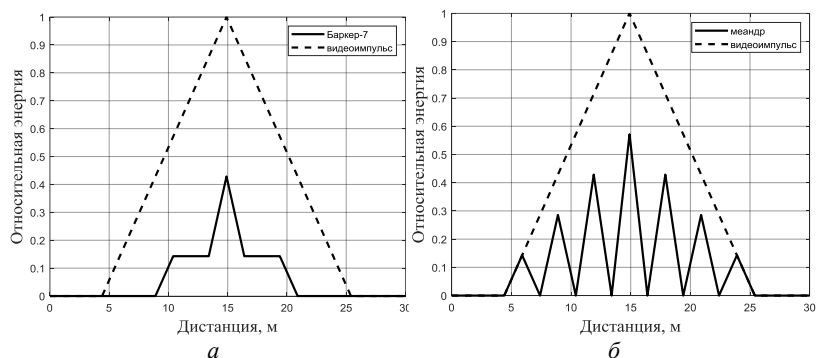


Рис. 1. Формы АЗВ для неполярных кодов:
а – код Баркера-7; *б* – код в виде меандра

Из графиков кодовых АЗВ, представленных на рис. 1, следует, что применение неполярного кода Баркера-7 приводит к значительно меньшему уровню боковых лепестков, чем при периодической кодовой последовательности, однако пиковый уровень в такой АЗВ мень-

ше и составляет лишь 40% от АЗВ на основе прямоугольных видеоимпульсов.

Далее на втором этапе моделирования был предложен способ получения АЗВ на основе биполярного кода Баркера-7 вида «-1 -1 -1 1 1 -1 1». Данный способ основан на многокадровой обработке сверток парциальных импульсов, составляющих код, инвертировании знака в определенных кадрах согласно коду и последующем суммировании всех полученных кадров. Результат работы вышеописанного способа формирования АЗВ на основе биполярного кода Баркера-7 представлен на рис. 2. Типы линий соответствуют принятым на рис. 1.

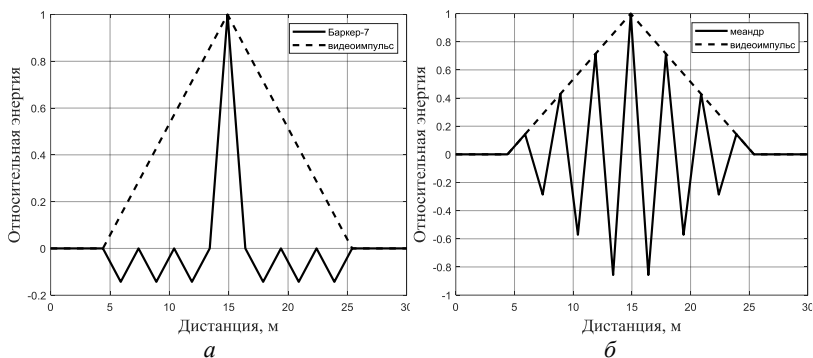


Рис. 2. Формы АЗВ для биполярных кодов: *а* – биполярный код Баркера-7; *б* – код в виде биполярного меандра

Из рис. 2, *а* следует, что пиковый уровень АЗВ на основе биполярного кода Баркера-7 равен максимальному уровню АЗВ на основе прямоугольных видеоимпульсов, однако его ширина по нулевому уровню в семь раз меньше, что определяется длиной кода $N = 7$. Отрицательные значения на результирующем изображении могут быть обнулены при его выводе. При этом, как показано на рис. 2, *б*, АЗВ на основе периодической последовательности (меандр) имеет множество боковых лепестков. Из проведенного моделирования следует, что применение кодовых последовательностей для формирования АЗВ в АИ ТИС весьма перспективно и требует проработки вопросов их аппаратной реализации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В.Г. Активно-импульсные приборы наблюдения // Вопросы оборонной техники. – 1994. – Вып. 3, 4 (142, 143). – С. 18–25.

2. Блок управления активно-импульсных телевизионных систем / Н.И. Мищенко, А.К. Мовчан, В.В. Капустин и др. // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 16–20.

3. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; ред. В.Е. Дулевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 607 с.

4. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

УДК 004.932.4

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
КОНТРАСТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ АКТИВНО-
ИМПУЛЬСНОЙ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ В НЕОДНОРОДНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДАХ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ**

И.Д. Мусихин, С.А. Забуга, студенты;

В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.;

Е.С. Познахарев, научный сотрудник ЛРОС ИОА СО РАН

г. Томск, ТУСУР, ilia.d.musikhin@tusur.ru

Представлено экспериментальное исследование коэффициента контрастности для изображений, получаемых активно-импульсной телевизионной измерительной системой в неоднородных средах распространения оптического излучения, таких как дым и туман различной плотности.

Ключевые слова: активно-импульсная телевизионная измерительная система, коэффициент контрастности, неоднородные оптические среды.

Измерение дальностей до объектов и их размеров – важная и актуальная задача, возникающая в различных прикладных областях. В настоящее время разработано множество устройств, методов и методик, позволяющих проводить дистанционное измерение расстояний до объектов [1–3].

Одним из устройств, предназначенных для построения карт глубин пространства и измерения расстояний до объектов интереса, является активно-импульсная телевизионная измерительная система (АИ ТИС) [4]. Из-за особенностей построения и принципов измерения дальностей АИ ТИС имеет возможность проводить измерение расстояний до объектов в поле зрения камеры даже в условиях замутненности среды распространения оптического излучения. Следует отметить,

что замутнённости среды вносит свои искажения в форму измерительной функции из-за влияния помехи обратного рассеяния.

В качестве исходных данных были взяты видеофайлы, полученные при проведении эксперимента в большой аэрозольной камере [5] (БАК Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)). Большая аэрозольная камера (объем 2000 м³) предназначена для экспериментальных исследований закономерностей распространения лазерных пучков в моделируемых аэрозольных образованиях (дымы, туманы и пр.).

Было использовано 15 видеофайлов, которые были записаны при использовании многозонного метода измерения дальности (ММИД) [6]. В общей сложности в видеофайлах содержится использование одного метода (ММИД) с длительностью импульса стробирования ЭОП 50 нс и длительностью импульса подсвета пространства 30 нс, трех задержек стробирования (80, 90 и 100 нс) и пять метеорологических сред распространения оптического излучения (чистая среда, дым, туман густой, туман средний и туман прозрачный). Изображения АТ ТИС для суммарной зоны при задержке стробирования 100 нс для дыма и густого тумана приведены на рис. 1.

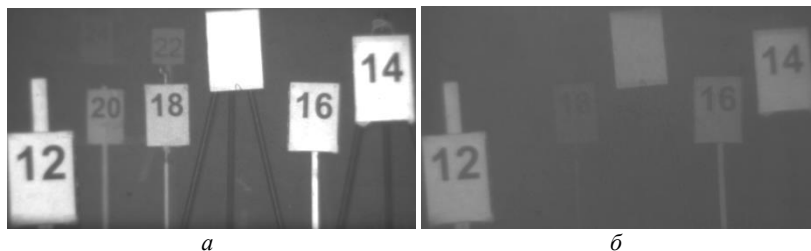


Рис. 1. Изображения с АИ ТИС для суммарной зоны при задержке стробирования 100 нс для дыма (а) и густого тумана (б)

Для оценки качества изображения и различимости транспарантов были рассчитаны коэффициенты контрастности. Контрастность – величина, характеризующая соотношение яркостей светлой и тёмной областей изображений объектов интереса.

В нашем случае коэффициент контрастности будет определяться по формуле (1). Эту величину также называют контрастностью Вебера, поскольку она входит как константа в закон Вебера–Фехнера [8].

$$k = \frac{I_o - I_b}{I_o}, \quad (1)$$

где k – коэффициент контрастности; I_o – яркость объекта; I_b – яркость фона.

В качестве инструмента для исследования использовалось разработанное авторами для этих целей ПО [7]. В программном обеспечении определялись области интереса на объекты и фон, после чего производилось накопление кадров, их усреднение и запись в файл средних значений их яркостей. Стоит отметить, что размеры и положения областей интереса не изменялись, а количество кадров, используемых для накопления и усреднения, оставалось равным 100.

Из-за особенностей ММИД для построения карты глубины пространства требуется сформировать два кадра особым образом, поэтому коэффициенты контрастности вычислялись для двух кадров: для кадров с суммарной зоной и с первой зоной.

Данные о коэффициенте контрастности, полученные при обработке видеофайла с задержкой стробирования 100 нс, представлены на рис. 2 и 3.

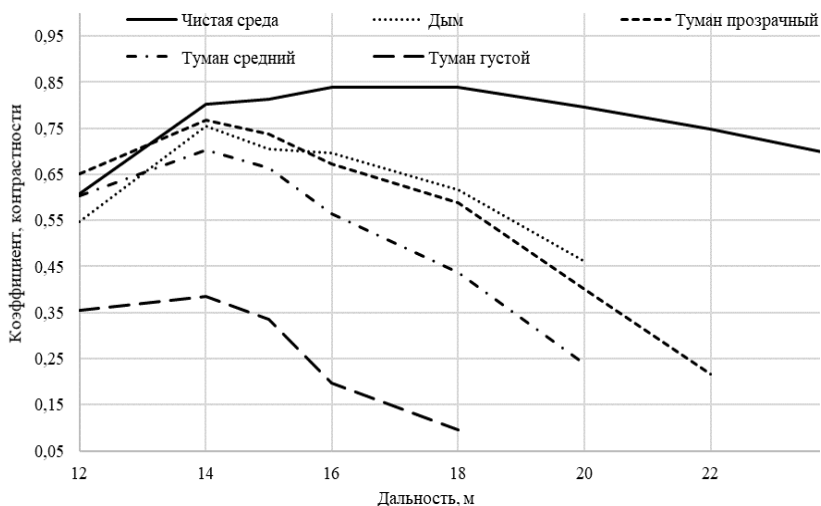


Рис. 2. Коэффициенты контрастности для суммарной зоны при задержке стробирования 100 нс

Из полученных данных и представленных графиков можно сделать вывод, что коэффициент контрастности уменьшается с расстоянием и с уменьшением оптической проницаемости среды. Контрастность в суммарной и первой зоне уменьшается в дыму – в 1,77 и 1,49 раза, в прозрачном тумане – в 2,41 и 1,78 раза, в среднем тумане – в 2,84 и 2,03 раза, в густом тумане – в 5,66 и 3,57 раза соответственно. Из представленных оптических сред сильнее всего контрастность понижает густой туман, а слабее всего – дым.

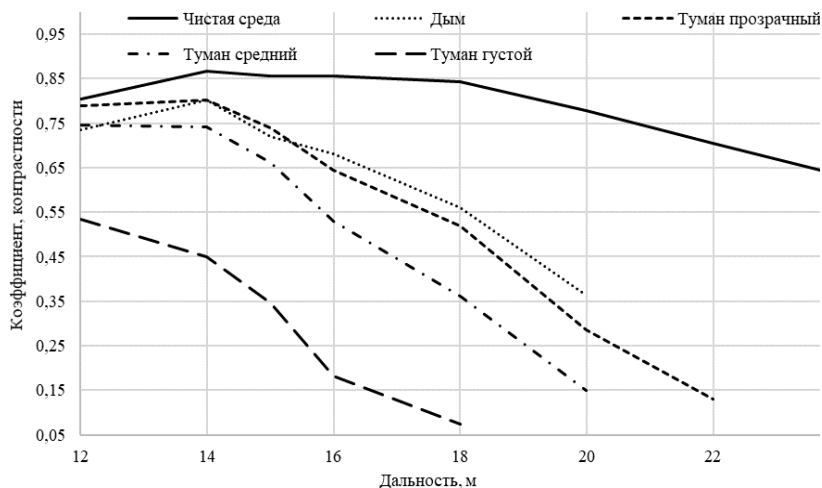


Рис. 3. Коэффициенты контрастности для первой зоны при задержке стробирования 100 нс

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташов В.М. и др. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Radiotekhnika. – 2020. – № 202. – С. 153–159.

2. Псевдобинокулярный ночной бинокль с функцией измерения дальности / В.Г. Волков, П.Д. Гиндин, В.В. Карпов, С.А. Кузнецов // XXVI Международный науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тезисы докладов, Москва, 25–27 мая 2022 г. – М.: «НПО «Орион», 2022. – С. 412–414. DOI: 10.51368/978-5-7164-1173-9-2022-412.

3. Легкоступ В.В. Методика определения дальности до объекта в разностно-дальномерной навигационной системе по доплеровским смещениям частоты / В.В. Легкоступ, В.Э. Маркевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2021. – № 4. – С. 40–46.

4. Distance Measurement using Active-Pulse Television Measuring Systems with Automatic Scanning of Space by Depth / A.K. Movchan, V.V. Kapustin, M.I. Kuryachiy, E.S. Movchan // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2023, Omsk. – P. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics60586.2023.10349593.

5. Аэрозольные камеры [Электронный ресурс]: офиц. сайт ИОА СО РАН. – URL: <https://iao.ru/ru/about/resources/equip/acams> (дата обращения: 12.02.2024).

6. Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems / E.S. Chaldina, A.K. Movchan, V.V. Kapustin, M.I. Kuryachiy // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and

Electron Devices (EDM), Chernal, Russia, 2020. – P. 293–297. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153500.

7. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023615399 РФ. Формирователь карт глубин АИ ТИС: № 2023614290: заявл. 11.03.2023: опубл. 14.03.2023 / И.Д. Мусихин, С.А. Забуга, В.В. Капустин, А. Мовчан; заявитель ФГБОУ ВО ТУСУР.

8. Wang W. Simple low-light image enhancement based on Weber–Fechner law in logarithmic space / W. Wang, Z. Chen, X. Yuan // Signal Processing: Image Communication. 2022. – Vol. 106. – P. 137–151.

УДК 004.932.4

ИСТОРИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ И.Н. ПУСТЫНСКОГО

***Е.В. Зайцева, к.т.н., А.А. Кочнева, к.т.н., доценты каф.
информатики и компьютерных технологий;***

***Е.В. Катунцов, к.т.н., первый зам. дир. Института
базового инженерного образования,
зам. по образовательной деятельности***

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

Проведен анализ научных трудов почётного работника высшего профессионального образования РФ, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора Пустынского Ивана Николаевича, рассмотрен его вклад в развитие направления технического зрения.

Ключевые слова: видеонаблюдение, техническое зрение, видеотракт, телевизионные системы.

Историю развития технического зрения, как его программной, так и аппаратной части стоит рассматривать как неотъемлемую часть развития датчиков «свет–сигнал», «сигнал–свет» и каналов связи между ними. Непосредственное отношение к эволюции датчиков «сигнал – свет», их изучению, исследованию имеют работы почётного работника высшего профессионального образования РФ, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора Пустынского Ивана Николаевича [1–3].

В 1950–60-х годах вся научная база расчёта видеоусилителей была создана под электровакуумные приборы [4–6]. Иван Николаевич разработал теорию и на её основе создал методику расчёта транзисторных видеоусилителей. Это стало поворотным моментом в уменьшении габаритов прикладных телевизионных установок, проектируе-

мых для просмотра ранее недоступных мест в горных подземных выработках, скважинах и других промышленных объектах [7–9].

В 1962 г. Иваном Николаевичем была опубликована монография «Расчёт транзисторных видеоусилителей» [10], которая позволила инженерным кадрам в области транзисторной схемотехники, проектировать и создавать прикладные телевизионные устройства [11–13].

Исследования И.Н. Пустынского в 1970–80-х гг., направленные на оптимальную нелинейную фильтрацию телевизионного измерительного сигнала [14–16], позволили оптимизировать параметры прикладных телевизионных систем и учитывать низкочастотные и высокочастотные шумы видеотракта, нестационарности шума датчиков «свет–сигнал». В системах технического зрения роботов стали возможны более точные измерения координат объектов [17, 18].

Теория оптимальной нелинейной фильтрации эффективно использовалась при построении телевизионных измерительных систем ориентации ряда космических кораблей типа «Союз». Иван Николаевич является автором более 200 научных работ.

И.Н. Пустынский взаимодействовал со многими научными телевизионными школами. К таким школам относятся Московская (МИИ-ГАиК), Санкт-Петербургская (ЛЭТИ, ВНИИТ), Курская (ЮЗГУ), Владимирская (ВлГУ). Такое сотрудничество позволяло проводить комплексные исследования и совместно искать пути решения тех или иных задач в области технического зрения.

Следует понимать, что те основы, которые были заложены И.Н. Пустынским, сейчас используются при проектировании систем технического зрения, промышленном телевидении и являются нашим интеллектуальным богатством. Практически нет ни одной области промышленности, в которой бы не применялось видеонаблюдение в том или ином виде. Требования к характеристикам систем технического зрения увеличиваются, возрастает количество интеллектуальных систем, основанных на телевизионной измерительной технике, но аспекты проектирования и расчета прикладных телевизионных измерительных систем базируются на принципах, заложенных в том числе и И.Н. Пустынским

ЛИТЕРАТУРА

1. Пустынский И.Н. Вопросы создания датчиков в системах прикладного телевидения и телевизионной автоматики // Межвузовский сборник «Груды II научн. сессии вузов Западной Сибири». – 1966. – Вып. 5. – С. 182–183.

2. Пустынский И.Н. Отношение сигнал/шум в телевизионных датчиках с транзисторными видеоусилителями // Доклады XXII Всесоюзной научной сессии, посвящённой Дню радио. – М., 1966. – С. 6–12.

3. Пустынский И.Н. К оценке погрешностей, обусловленных шумами, при измерениях телевизионными способами / И.Н. Пустынский, А.Г. Ильин // Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 1969. – Вып. 3. – С. 69–79.
4. Активно-импульсные телевизионные системы «Зонд» и «Обзор» / И.Н. Пустынский, В.В. Белов, В.С. Белоусов, Б.Д. Борисов, П.А. Дегтярев и др. // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – № 11. – С. 51–53.
5. Пустынский И.Н. Уточнение зависимости освещённости оптического изображения от освещённости объекта в телевизионных датчиках // Доклады ТУСУР. – 2009. – № 1. – С. 36–39.
6. Пустынский И.Н., Ильин А.Г. Определение оптимальной полосы частот видеоусилителя телевизионных измерительных устройств // Вопросы радиоэлектроники. – Сер.: Техника телевидения. – 1970. – Вып. 1. – С. 99–110.
7. Kulikova E.Y. Specifics of geotechnical risk control in the design of underground structures / E.Y. Kulikova, A.G. Polyankin, A.M. Potokina // Journal of Mining Institute. – 2023. – Vol. 264. – P. 895–905.
8. Zemenkova M.Y. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies / M.Y. Zemenkova, E.L. Chizhevskaya, Y.D. Zemenkov // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 258. – P. 933–944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.
9. Vystrchil M.G. A method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey / M.G. Vystrchil, V.N. Gusev, A.K. Sukhov // Journal of Mining Institute. – 2023. – Vol. 262. – P. 562–570.
10. Пустынский И.Н. Расчёт транзисторных видеоусилителей. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1962. – 128 с.
11. The use of unmanned aerial photography for interpreting the echnogenic transformation of the natural environment during the oil field operation / SA. Buzmakov, P.Yu. Sannikov, L.S. Kuchin, E.A. Igosheva, I.F. Abdulmanova // Journal of Mining Institute. – 2023. – Vol. 260. – P. 180–193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22.
12. Makhovikov A.B. Development of the boundaries of science and education in the USSR (Russia) from the 1960s to the end of the 2010s. (based on materials from St. Petersburg Mining University) // Questions of history. – 2022. – No. 11. – P. 56–69. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202211Statyi08.
13. Litvinenko V.S. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers. Implications for ESG principles and sustainable development goals / V.S. Litvinenko, I. Bowbrick, I.A. Naumov, Z. Zaitseva // J. of Cleanel Production. – 2022. – No. 338. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
14. Пустынский И.Н. Телевизионно-вычислительная система доступа к информационным ресурсам и возможности её использования в дистанционных образовательных технологиях / И.Н. Пустынский, М.И. Курячий, В.В. Ким // Известия МАН ВШ. – 2004. – № 1 (27). – С. 147–151.
15. Kryltcov S.B. Novel approach to collect and process power quality data in medium-voltage distribution grids / S.B. Kryltcov, A.B. Makhovikov, M.A. Koro-

bitsyna // Symmetry. – 2021. – Vol. 3, № 13. – P. 460–460. DOI: 10.3390/sym13030460.

16. Система защищенной корпоративной связи для металлургического предприятия / А.Б. Маховиков, С.Б. Крыльцов, К.В. Матрохина, В.Я. Трофимец // Цветные металлы. – 2023. – № 4. – С. 5–13. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01

17. The practice of using vazm-1m analyzer in monitoring and control systems designed for tube mills and mill/ cyclone stages / I.V. Sokolov, V.V. Vasiliev, E.A. Lebedik // Tsvetnye Metally. – 2023. – № 4. – P. 71–76. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.09.

18. Experimental evaluation of the multiphase flow effect on sand production process: Prepack sand retention testing results / D. Tananykhin, M. Grigorev, M. Korolev, T. Solovyev, N. Mikhailov, M. Nesterov // Energies. – 2022. – 15 (13). – P. 1–17. DOI: 10.3390/en15134657.

УДК 004.932.4

ОСОБЕННОСТИ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Е.В. Зайцева, к.т.н., А.А. Кочнева, к.т.н., доценты каф. информатики и компьютерных технологий;

Е.В. Катунцов, к.т.н., первый зам. дир. Института базового инженерного образования,

зам. по образовательной деятельности

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

Ароведен анализ опроса, проведённого редакцией журнала «Системы безопасности» среди специалистов в области видеонаблюдения, выявлены основные направления научных исследований для решения задач в области эксплуатации промышленного телевидения.

Ключевые слова: видеонаблюдение, техническое зрение, сложные условия, низкие температуры, зашумлённость.

Современным системам видеонаблюдения приходится работать в сложных условиях наблюдения: при низких и высоких температурах, освещённости, влажности, запыленности. Представляет интерес определить факторы, заслуживающие особого внимания с точки зрения инженерных специалистов в области технического зрения. Редакция журнала «Системы безопасности» предложила специалистам в области видеонаблюдения ответить на вопросы о возникающих трудностях в области эксплуатации промышленного телевидения [1]. В опросе приняли участие 258 специалистов, из них 40% являются производителями, разработчиками, интеграторами или другими предста-

вителями бизнеса, 35% – корпоративными заказчиками, 13% работают в профильных государственных службах и правоохранительных органах.

Первый вопрос касался внешнего воздействия на видеокамеру. В верхней строчке списка оказались запылённость, повышенная влажность и экстремально низкие температуры. Подобные факторы также характерны для горной и нефтедобывающей отраслей в местах видеосъёмки при добыче природных ископаемых [2–4]. Отсюда следует сделать вывод, что исследования характеристик датчиков «свет–сигнал» (ПЗС, КМОП) является важным аспектом проектирования телевизионных систем, работающих в промышленности [5–7]. Следует обратить особое внимание на устойчивость преобразователей к температурному воздействию, влажности. Также стоит уделить повышенное внимание цифровой обработке изображений, устраняющей по возможности последствия запылённости [8–10].

Второй вопрос коснулся сегментов рынка с наиболее сложными условиями для видеонаблюдения. Лидирующую позицию заняло уличное видеонаблюдение в условиях Крайнего Севера. Это прекрасно коррелирует с ответом на вопрос о внешних воздействиях – экстремально низкими температурами. Очевидно, что сложные условия для видеонаблюдения как раз и связаны с экстремально низкими температурами. На втором месте находятся металлургия и металлообработка. Здесь следует уделить внимание исследованию структуры кодирующих фильтров и разделению падающего света на спектральные диапазоны (R, G, B) [11–13].

Третий вопрос затронул основные проблемы термокожухов. И снова здесь очевидна взаимосвязь с первым вопросом: три первые позиции занимают такие проблемы, как нарушение герметичности, неудобство конструкции и монтажа, а также выход из строя обогревательных элементов, термостатов и вентиляторов. Понятно, что видеонаблюдение в условиях экстремально низких температур требует повышенного внимания к конструкциям термокожухов, для максимального предотвращения нарушения герметичности. Также следует дополнительно провести исследования термостатов и вентиляторов для оценки их работоспособности в условиях низких температур [14–16].

Четвертый вопрос посвящен мнению участников о внешних факторах, от которых труднее всего защитить видеокамеру. На первом месте оказалась запыленность, подтверждая ещё раз важность исследований и совершенствование проектных решений в борьбе с этим фактором. На втором месте оказался фактор агрессивной среды (кислотной, щелочной), а на третьем – вибрация. Эти особенности видео-

наблюдения в сложных условиях встречаются впервые, но говорят об актуальности проведения исследований и в этих областях в контексте технического зрения [17].

Проанализировав результаты опроса профильных специалистов в области видеонаблюдения, можно обозначить круг задач для исследований особенностей применения систем технического зрения и промышленного телевидения в сложных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чура Н. Видеонаблюдение в сложных условиях. Результаты исследования // Системы безопасности. – 2021. – № 1. – С. 1–4.

2. Evaluating the use of unmanned aerial vehicles for transportation purposes / C.N. Brooks, R.J. Dobson, D.B. Dean, D. Banach, T. Oommen, T.C. Havens, T. Ahlborn, S.J. Cook, A. Clover // Michigan Department of Transportation. – 2015. – Report No. RC-1616. – 201 p.

3. An optimum deployment algorithm of camera networks for open-pit mine slope monitoring / H. Zhang, P. Tao, X. Meng, M. Liu, X. Liu // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – Article 1148. DOI: 10.3390/s21041148.

4. Design of a digital 3D model of transport—technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information / I.A. Temkin, A. Myaskov, S. Deryabin et al. // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 18. – Article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

5. Arena F. An overview on the current status and future perspectives of smart cars / F. Arena, G. Pau, A. Severino // Infrastructures. – 2020. – Vol. 5, No. 7. – Article 53. DOI: 10.3390/infrastructures5070053.

6. Increasing the content of coarse fractions in the mined coal mass by a combine using aired cuts / V.V. Gabov, V.X. Nguyen, D.A. Zadkov, D.Th. Tran // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 257. – P. 764–770. DOI: 10.31897/PMI.2022.66

7. Zubov V.P. Development of resource – saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines) / V.P. Zubov, Le Quang Ph. // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 257. – P. 795–806. DOI:10.31897/PMI.2022.72.

8. Mathematical modeling of the electric field of an in-line diagnostic probe of a cathode-polarized pipeline / V.N. Krizskii, O.V. Kosarev, P.N. Aleksandrov, Y.A. Luntovskaya // Journal of Mining Institute. – 2024. – Vol. 265. – P. 156–164.

9. Kamenskiy A.V. High-speed recursive-separable image processing filters // Computer Optics. – 2022. – Vol. 46, No. 4. – P. 659–665.

10. Zemenkova M.Y. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies / M.Y. Zemenkova, E.L. Chizhevskaya, Y.D. Zemenkov // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 258. – P. 933–944. DOI: 10.31897/PMI.2022.105.

11. Kam H.S. Noise detection fuzzy (NDF) filter for removing salt and pepper noise / H.S. Kam, W.H. Tan // Lecture Notes Comput. Sci. – 2009. – Vol. 5857. – P. 479–486.

12. Makhovikov A.B. Development of the boundaries of science and education in the USSR (Russia) from the 1960s to the end of the 2010s. (based on materials from St. Petersburg Mining University) // Questions of history. – 2022. – No. 11. – P. 56–69. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202211Statyi08.
13. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers. Implications for ESG principles and sustainable development goals / V.S. Litvinenko, I. Bowbrick, I.A. Naumov, Z. Zaitseva // J. of Cleanel Production. – 2022. – No. 338. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
14. Kryltcov S. B. Novel approach to collect and process power quality data in medium-voltage distribution grids / S. Kryltcov, A.B. Makhovikov, M.A. Korobitsyna // Symmetry. – 2021. Vol. 3, No. 13. – P. 460–460. DOI: 10.3390/sym13030460.
15. Система защищенной корпоративной связи для металлургического предприятия / А.Б. Маховиков, С.Б. Крыльцов, К.В. Матрохина, В.Я. Трофимец // Цветные металлы.– 2023. – № 4. – С 5–13. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.01.
16. Sokolov I.V. The practice of using vazm-1m analyzer in monitoring and control systems designed for tube mills and mill/ cyclone stages / V.V. Morozov, V.V. Vasiliev, E.A. Lebedik // Tsvetnye Metally. – 2023. – № 4. – P. 71–76. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.09.
17. Model and simulation of engineering safety risk control based on artificial intelligence algorithm / Z. Liu, X. Zhao, J. Tan, H. Tian // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2022. – P. 1–12. DOI: 10.1155/2022/3204317.

УДК 004.032

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ РОБОТА DA VINCI НА ВИДЕОЗАПИСЯХ ОПЕРАЦИЙ

Л.А. Литохин, студент каф. ТУ

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2204. Методы и алгоритмы машинного зрения
для навигации автономных мобильных роботов
и интеллектуальных транспортных средств
г. Томск, ТУСУР, lev.litokhin@gmail.com*

Рассматриваются метод трансферного обучения модели нейронной сети на уникальном наборе данных и оценка эффективности полученных весов. В алгоритме использовалась нейронная сеть архитектуры YOLOv5, оценкой эффективности которой служила вероятность предсказания класса.

Ключевые слова: YOLOv5, нейронная сеть, автоматическое обнаружение объектов, компьютерное зрение.

Задачи автоматического обнаружения и распознавания объектов на изображениях не теряют своей актуальности и сферы их применения постоянно расширяются.

В данной работе проведена оценка эффективности работы нейронной сети в реализации обозначенных задач. Актуальность данной работы заключается в сфере её применения. Медицина – перспективное направление для внедрения технологий компьютерного зрения и результаты данного исследования могут быть использованы с этой целью.

Сверточные нейронные сети. Сверточные нейронные сети или же CNN (convolutional neural network) – это однонаправленные многослойные сети, получившие своё название из-за операции свертки изображения на матрицу свертки. Их структура представляет собой набор чередующихся слоёв: сверточных, активации и субдискретизации (подвыборки).

Свёрточный слой представляет собой набор карт признаков, имеющих фильтр (сканирующее ядро). Фильтр скользит по области карты и находит определенные признаки объектов. Операцию свертки можно понять как кодирование признака, например, угла наклона или формы объекта.

Следующий слой (активации) служит для преобразования данных и представляет собой нелинейную функцию, чаще всего ReLU (Rectified Linear Unit). Данная функция преобразует входное значение в значение от 0 до положительной бесконечности. Это простая и эффективная функция, отсекающая отрицательную скалярную величину.

Следующий слой (подвыборки) служит для уплотнения карт признаков с предыдущих слоёв. Это происходит путем выборки наибольшего значения, что уменьшает объем изображения. Благодаря этому слою происходит отсечение ненужных деталей из исходного изображения, оставляя только ключевые признаки объекта [1, 2].

YOLO. Данная модель обладает значительным отличием от прочих сверточных нейронных сетей. Модели семейства YOLO достаточно быстродействующие, потому имеется возможность распознавать объекты в реальном времени. Такая скорость достигается благодаря тому, что нейросеть обрабатывает полученное изображение один раз и вместо точного определения объекта делает предсказание наличия какого-либо объекта на изображении [3, 4].

Предсказание объекта происходит в тот момент, когда множество определенных нейросетью границ объектов пересекаются в одном месте, в то же время другие, единичные границы, просто отбрасываются, поскольку ни к чему не были привязаны, что говорит об вероятном отсутствии объекта.

Реализация алгоритма автоматического обнаружения хирургических инструментов. Реализация обнаружения объекта проводилась нейросетью архитектуры YOLOv5 с помощью ПО PyCharm, языка программирования Python, библиотек gitpython, matplotlib, numpy, opencv-python, Pillow, torch, torchvision.

Необходимые для обучения сети данные представляют собой набор кадров, вырезанных из видеозаписей операций и собранных в датасет (рис. 1).

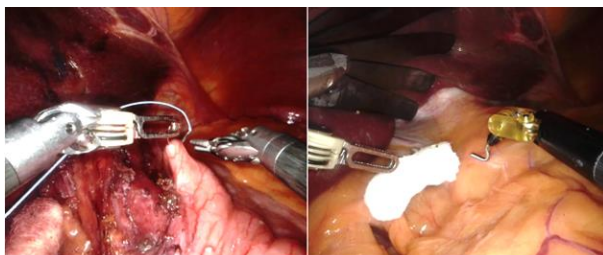


Рис. 1. Пример изображений для датасета

Для создания датасета было использовано ПО Roboflow. По завершению этапа создания обучающей выборки был получен датасет из 1 334 изображений. Такого количества данных недостаточно для обучения нейронной сети с высокой точностью, потому была проведена аугментация изображений. Данная операция подразумевает изменение оригинального изображения (поворот, искажение, добавление шума). В результате объем датасета был увеличен до 3 194 изображений, содержащих 5 классов для каждого инструмента соответственно.

Далее необходимо обучить нейронную сеть определять хирургические инструменты, присутствующие в кадре, для чего применялся метод трансферного обучения. Данный метод предполагает использование предварительно обученной модели для задач с новым набором данных. Данные о процессе обучения нейронной сети представлены на рис. 2.

На рисунках показана зависимость от итерации потерь нейронной сетью области возможных объектов (см. рис. 2, *a*), объекта (см. рис. 2, *b*) и класса объекта (см. рис. 2, *в*). На рис. 3 показаны результаты финальной итерации нейронной сети.

Для оценки эффективности работы обученной нейронной сети необходимо дать ей определять объекты на кадрах записей операций.

На рис. 4 представлены определенные нейросетью границы возможных объектов и вероятные классы объектов в этих границах.

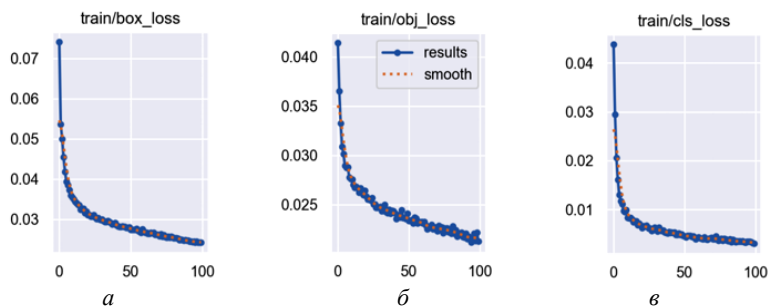


Рис. 2. Коэффициенты потерь области координат (a), объекта (b), класса (c) на изображении

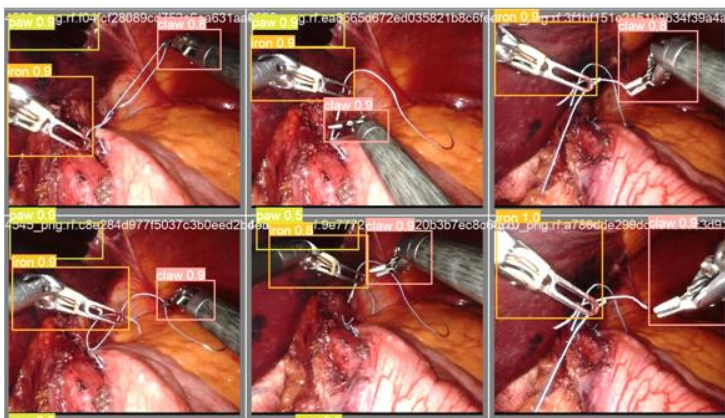


Рис. 3. Предсказания нейронной сети в процессе обучения

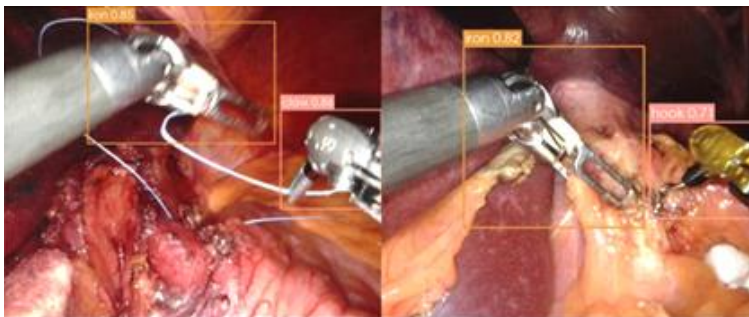


Рис. 4. Пример работы нейронной сети

Точность работы нейронной сети оценивается непосредственно на кадрах из обучающей выборки и составляет от 0,7 до 0,9, что на сегодняшний день не считается высоким результатом.

Объект может быть потерян при значительном отклонении от обучающей выборки из-за низкой уверенности нейронной сети. Помимо всего, происходит ложное определение прочих классов, поскольку они не были предварительно удалены из весов, используемых для трансферного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cygert S. Robust object detection with multi-input multi-output faster R-CNN / S. Cygert, A. Czyżewski // International Conference on Image Analysis and Processing. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 572–583.

2. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. – 2015. – Vol. 28.

3. Kim J.H. et al. Object detection and classification based on YOLO-V5 with improved maritime dataset // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 377.

4. Jocher G. et al. Ultralytics/yolov5: v6. 2-yolov5 classification models, apple m1, reproducibility, clearml and deci. ai integrations // Zenodo. – 2022.

УДК 004.932.4

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАЗНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*И.А. Романтеев, студент; А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vanya889605@gmail.com*

Представлено описание моделей нейронных сетей YOLOv5 и YOLOv8. Выполнено обучение и тестирование моделей нейронных сетей на основе релевантного набора данных.

Ключевые слова: нейронная сеть, набор данных, архитектура, машинное обучение, летательные аппараты.

Обнаружение летающих объектов остается сложной задачей из-за больших различий в пространственных размерах/соотношениях сторон, скорости, окклюзии и сгруппированном фоне. Чтобы решить некоторые из представленных проблем и одновременно максимизировать производительность, используются современные детекторы одиночных снимков YOLOv8 и YOLOv5 в попытке найти наилучший компромисс между скоростью вывода и отображением. Предоставляется подробное объяснение функциональных возможностей, адапти-

рованных в YOLOv8 и YOLOv5 Окончательная обобщенная модель YOLOv8 достигает значения mAP50-95, равного 0,685, и средней скорости вывода на видео 1080p со скоростью 50 кадров в секунду. Впоследствии усовершенствованная и обученная модель поддерживает эту скорость вывода и достигает улучшенного значения mAP50-95, равного 0,835.

YOLOv5 – это разработка Ultralytics 2020 г., представляет собой прорыв в области распознавания объектов, обеспечивая высокую эффективность на данных COCO. Эта система выделяется своей скоростью и простотой в использовании, предлагая инновационную структуру из трех частей: основание, соединительный элемент и аналитическую часть. В её основе лежит Darknet53, концентрирующийся на точном выделении характеристик через малые фильтры и резидуальные связи для оптимизации обработки данных. Соединительная часть гармонично связывает основание с аналитической частью, улучшая обработку и классификацию данных на разных уровнях, в то время как SPP и CSP усиливают гибкость и эффективность модели, облегчая работу с изображениями разных размеров и улучшая передачу информации внутри сети [1].

Аналитический компонент YOLOv5 разделяется на три отдела для идентификации объектов разной величины. Используя сетки разных размеров (13×13, 26×26, и 52×52), каждая из которых способна предсказывать три контура, модель обеспечивает точность в определении размеров и расположений объектов. Процесс включает вычисление вероятности классов и оценки достоверности для каждого контура. Для устранения пересечений контуров применяется метод немаксимального подавления (NMS), повышающий точность и четкость результатов распознавания.

YOLOv8 представляет собой наиболее совершенную модификацию в серии YOLO, сохраняя архитектурные принципы предшественников с добавлением значительных усовершенствований. Нововведения включают улучшенную нейросетевую структуру, интегрирующую функциональную сеть Pyramid (FPN) и сеть агрегации путей (PAN), обеспечивая более глубокое и масштабируемое распознавание объектов на различных уровнях. Также представлен инновационный инструмент аннотации, упрощающий маркировку за счет автоматизации, предоставляя более эффективные способы подготовки данных для тренировки модели [2].

Для оценки эффективности обучения моделей нейронных сетей используется метрика средней точности (mAP). Она служит ключевым критерием для оценки эффективности в задачах распознавания

объектов, суммируя точность обнаружения (AP) по всем категориям при определенном пороге. Эта метрика различает корректные и неверные определения объектов, основываясь на сравнении предсказанного расположения с фактическим и учитывая порог схожести. Истинное определение объекта происходит при превышении этого порога, в то время как результаты ниже порога считаются ошибочными [1].

Для первого предобучения использовался датасет, содержащий 15 064 изображения на 40 классов. Модель заучивала обобщенное представление летающих объектов. На рис. 1 приведен пример изображения из первого набора данных.



Рис. 1. Пример изображения из первого набора данных (истребители)

Далее предобученные модели обучались и тестировались на датасете, в котором содержатся изображения, более репрезентативные для среды «реального мира» (смена фона, маленький размер объекта на изображении и т.п.). Классов 4 – дрон, самолет, вертолет, птица. Количество изображений – 11 998. На рис. 2 приведен пример изображения из второго набора данных, на котором представлен дрон.



Рис. 2. Пример изображения из второго набора данных (дрон)

Результаты тестирования моделей нейронных сетей. В процессе машинного обучения была задействована следующая вычислительная конфигурация оборудования: CPU: (AMD Ryzen 7 3750H with Radeon Vega Mobile Gfx). GPU: NVIDIA GeForce GTX 1650. RAM: 15.7GB. Время полных 2 эпох машинного обучения для модели YOLOv8 версии архитектуры «S» составило 22,244 ч. Время полных 2 эпох машинного обучения для модели YOLOv5 версии архитектуры «S» составило 15,25 ч. На рис. 3 и 4 приведены графики показателей разных параметров двух моделей нейронных сетей.

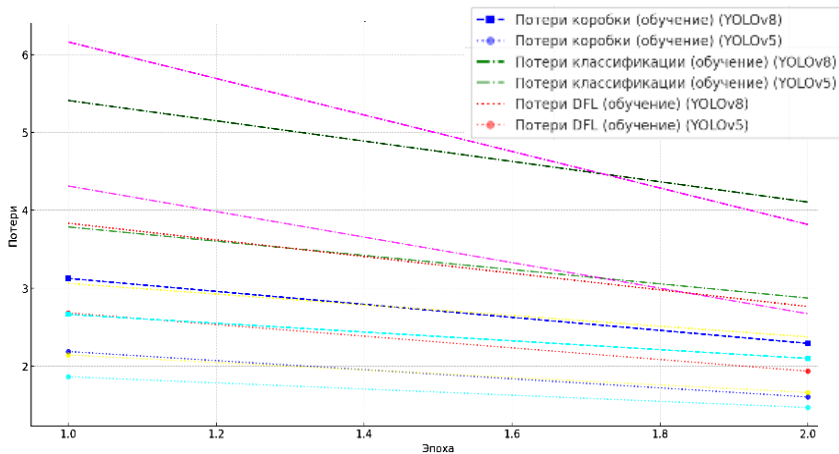


Рис. 3. Графики потерь YOLOv8 и YOLOv5

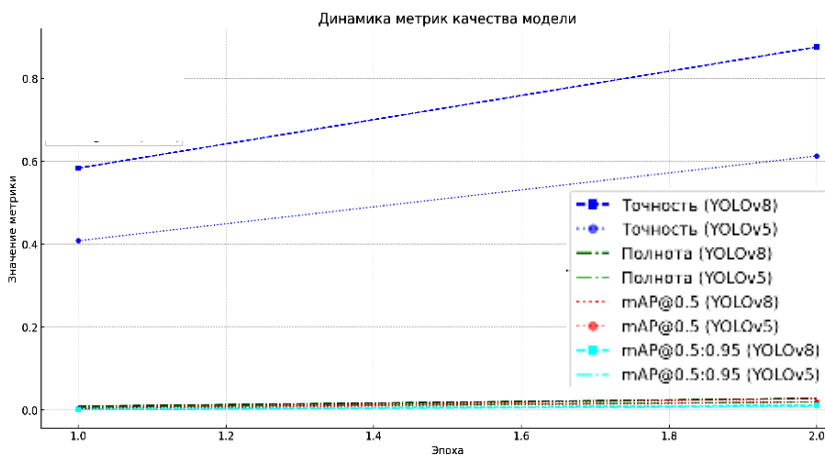


Рис. 4. Графики параметров YOLOv8 и YOLOv5

Показатели точности (Accurasy) и метрики mAP (Mean Average Precision) для YOLOv8 лучше, чем для YOLOv5, что указывает на более эффективное обучение и способность модели YOLOv8 правильно идентифицировать и классифицировать объекты на изображениях. Потери в процессе обучения (Loss) для YOLOv8 также показывают более заметное уменьшение по сравнению с YOLOv5, что может свидетельствовать о лучшем обучении и возможной более высокой общей эффективности модели. Учитывая, что YOLOv8 показывает улучшение метрики mAP на 30% по сравнению с YOLOv5, это значительный «выигрыш» в производительности, который может означать лучшую способность модели к детектированию объектов с более высокой точностью, особенно в сложных сценариях с большим количеством объектов или при низких порогах обнаружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sik-Ho Tsang – YOLOv5 for Object Detection [Электронный ресурс]. – URL: <https://sh-tsang.medium.com/brief-review-yolov5-for-object-detection-84cc6c6a0e3a> (дата обращения: 16.02.2024).

2. Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8 / Dillon Reis, Jordan Kupiec, Jacqueline Hong, Ahmad Daoudi. – Georgia: Institute of Technology [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2305.09972.pdf> (дата обращения: 05.03.2024).

УДК 004.855.5

РАЗМЕТКА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ РАСПОЗНАВАНИЮ МЕДИЦИНСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

***К.С. Куприянова, студентка; К.А. Рылов, ст. преп. каф. ТУ;
М.И. Курячий, проф. каф. ТУ***

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов
анализа и обработки фото- и видеоданных
в телевизионных измерительных системах
г. Томск, TVCYP, kuprianovak8@gmail.com*

Работа посвящена проблеме подготовки набора данных для обучения моделей нейросетей. Авторами рассматриваются виды и методы разметки данных, представленных в виде изображений, инструментальные средства их реализации. Целью данной работы является оценка сложности подготовки и достаточности набора данных для обучения нейросети.

Ключевые слова: нейросети, разметка данных, машинное обучение, аннотирование данных, методы разметки, сегментация.

Важным этапом в процессе построения моделей нейросетей является подготовка данных. Качество подготовленного набора данных, используемого для обучения модели нейросети, оказывает прямое влияние на её способность делать точные прогнозы [1].

Процесс создания набора данных проходит в несколько этапов в зависимости от сложности решаемой задачи. Только после длительного процесса сбора, очистки, структурирования и разметки информации ее возможно использовать для обучения нейросети.

В работе данными для разметки являются изображения, полученные путём извлечения кадров из видеозаписей роботических эндоскопических операций. Для того, чтобы модель нейросети могла распознать необходимые объекты интереса на изображениях, требуется добавить соответствующие аннотации к видеоданным, т.е. разметить изображения. Полученные аннотации описывают признаки и характеристики изображений. Они позволяют модели находить и определять паттерны в исходных данных. Найденные паттерны используются для распознавания и детектирования искомых объектов на новых входных данных [2].

Разметкой данных называется процесс структурирования и аннотации необработанных данных с целью приведения к виду, используемому в нейросети. В случае разметки изображений происходит добавление аннотаций, меток или тэгов к изображениям. Полученные аннотации хранят информацию о содержании изображения, такую как расположение искомых объектов и их классы [3].

Предложены и апробированы основные виды разметки изображений.

1. Разметка изображений посредством прямоугольников (bounding box). С помощью данного метода модель обучается детектировать объекты и оценивать их расположение в кадре. Такие модели используются для обнаружения, подсчёта и отслеживания объектов интереса на изображениях или видеопотоках.

2. Разметка многоугольниками (сегментация). В процессе разметки данным методом выполняется классификация каждого пикселя изображения и выделение объектов интереса отдельными сегментами (масками). Сегментация изображений, в свою очередь, делится на подразделы: семантическая сегментация, инстанс-сегментация и паноптическая сегментация.

Для задач распознавания медицинских инструментов в данной работе выбрана инстанс-сегментация, так как данный вид сегментации позволяет локализовать каждую полученную область пикселей и

разделить объекты на отдельные экземпляры-сегменты (инстансы), даже если они относятся к одному целевому классу.

Существует три основных метода разметки изображений: ручная разметка, полуавтоматическая разметка, автоматическая разметка.

Ручной разметкой данных называется метод, при котором добавление аннотаций к изображениям происходит вручную. Данный метод обеспечивает высокую точность определения расположения объектов интереса, но требует большого количества времени и ресурсов, усидчивости и внимательности.

Полуавтоматическая разметка – метод, который включает в себя ручную разметку и использование инструментов автоматической разметки, чаще всего с использованием предобученной модели нейросети. Предобученная модель распознаёт необходимые объекты на входном наборе данных, затем аннотатор вручную проверяет и дополняет разметку полученного набора данных.

Автоматическая разметка – метод разметки данных, который происходит с помощью алгоритмов и моделей машинного обучения. Данный метод подходит для больших наборов данных, но он менее точен.

Для обеспечения качественного обучения модели нейросети необходим большой объём обучающего набора данных – порядка тысячи изображений на один класс. Разметка такого объёма данных требует большого количества затрачиваемого времени. В целях экономии ресурсов применяются методы автоматической и полуавтоматической разметки.

Разметка подготовленного набора изображений посредством прямоугольников производилась с использованием открытого и свободно распространяемого программного обеспечения LabelImg [4].

Разметка обучающего набора фотоданных с помощью полигонов (сегментация) производилась с использованием открытого приложения LabelMe [5].

По результатам проведённой работы подготовлен набор данных, состоящий из 860 изображений. Каждое изображение имеет от 1 до 4 размеченных классов объектов интереса. Для проверки качества подготовленного набора данных проведён эксперимент: сформированный набор данных использован для обучения нейросети и последующей оценки точности распознавания объектов интереса.

По итогам завершения обучения выводятся графики результатов распознавания искомых объектов, представленные на рис. 1 [6].

На рис. 1, *a* изображена матрица ошибок, которая даёт детальное представление о результатах, показывая количество истинных (поло-

жительных и отрицательных) и ложных (положительных и отрицательных) срабатываний для каждого класса. По горизонтальной оси матрицы расположены названия классов и откладываются значения истинно верно расположенных объектов интересов. По вертикальной оси откладываются значения, «верно» или «неверно» распознанных моделью объектов по каждому классу. Значения в точках пересечения распознанных моделью (predicted) и истинно расположенных объектов (true) определяют количество истинно положительных, истинно отрицательных, ложноположительных и ложноотрицательных результатов.

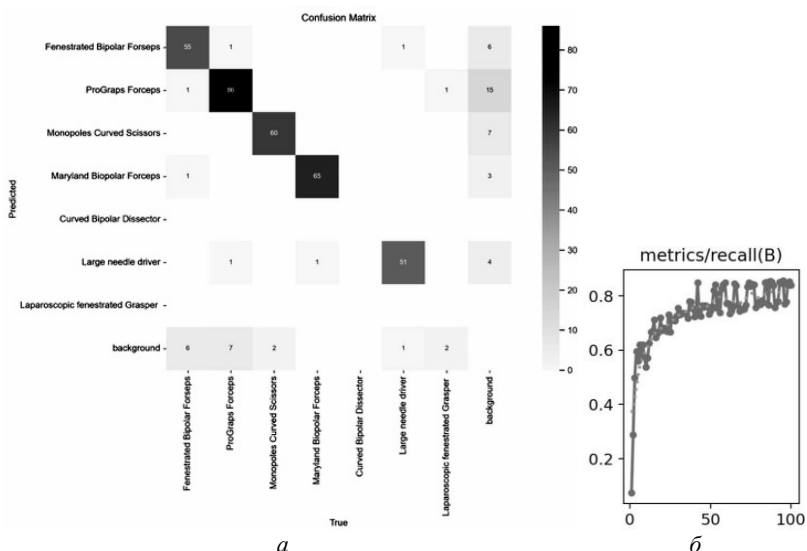


Рис. 1. Результаты обучения нейросети:
 a – матрица ошибок, b – кривая полноты

На рис. 1, b изображен график показателя полноты (recall), который отражает способность модели обнаруживать признаки, относящиеся к отдельным классам объектов интереса. Из графика следует вывод, что с каждой последующей эпохой значение показателя полноты увеличивается, но остаётся наличие выбросов. Это означает, что модель нейросети недообучена и необходимо провести повторное обучение.

Исходя из результатов обучения, следует: модель нейросети недообучена. Причиной такого результата является недостаток количества размеченных данных, а также малое количество заданных эпох обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Ю.А. и др. Подготовка набора данных для обучения и тестирования программного обеспечения на основе технологий искусственного интеллекта: учеб. пособие. – М.: Литрес, Издательские решения, 2024. – 140 с.
2. Разметка данных в машинном обучении: процесс, разновидности и рекомендации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/678524/>, свободный (дата обращения: 10.02.2024).
3. Михайлов А.А. Автоматическая разметка данных для сегментации изображений документов с использованием глубоких нейронных сетей // Труды ИСП РАН. – 2022. – Т. 34, № 6. – С. 137–145.
4. LabelImg, программа для разметки изображений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pypi.org/project/labelImg/>, свободный (дата обращения: 15.02.2024).
5. LabelMe, программа для разметки изображений [Электронный ресурс]: сайт для установки. – URL: <https://github.com/labelmeai/labelme> (дата обращения: 17.02.2024).
6. Глубокое погружение в метрики производительности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/>, свободный (дата обращения: 07.03.2024).

УДК 004.932.4

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.А. Шмырёва, В.И. Пермяков, студенты каф. ТУ

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

Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов анализа

*Эи обработки фото- и видеоданных в телевизионных
измерительных системах*

г. Томск, ТУСУР, Annashmyreva1805@gmail.com

Работа посвящена реализации программы для использования методов восстановления изображений. Описан алгоритм работы интерфейса программы. Рассмотрены основные методы восстановления изображений.

Ключевые слова: шум, фильтр максимума, фильтр минимума, среднеарифметический фильтр, среднегеометрический фильтр.

Применение фильтров для восстановления изображений является в современном мире актуальной и важной задачей в области обработки изображений по следующим причинам: восстановление поврежденных изображений, улучшение качества изображений, реставрация различных исторических и художественных произведений, улуч-

шение качества медицинских изображений, улучшение качества видеоконтента.

Шум на изображениях – это случайные и нежелательные изменения яркости или цвета пикселей, которые появляются в результате различных факторов, таких как электромагнитные помехи, недостаточное освещение, передача и обработка данных, а также качество оборудования. Шум может существенно ухудшить качество изображения, делая его менее четким, размытым или искаженным. Отсутствие или минимальное количество шума является желаемым состоянием для достижения высокого качества изображения [1].

В программу встроены ряд цифровых фильтров:

- среднеарифметический фильтр предназначен для сглаживания или размытия изображений. Он работает путем вычисления среднего арифметического значений пикселей в окне определенного размера;
- среднегеометрический фильтр предназначен для сглаживания и уменьшения шумов на изображении. Он вычисляет среднее геометрическое значение пикселей в окне определенного размера;
- фильтр максимума выбирает наибольшее значение. Он сравнивает каждое значение с предыдущим значением и выбирает наибольшее;
- фильтр минимума выбирает наименьшее значение. Он сравнивает каждое значение с предыдущим значением и выбирает наименьшее [2].

Рассмотрим алгоритм функционирования программы, который подробно описывает, как программа должна работать в конечной версии, блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

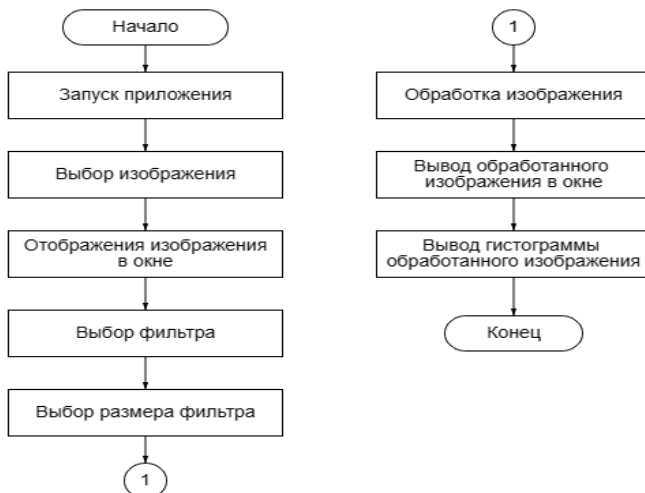


Рис. 1. Алгоритм работы программы

В пункте «Выбор изображения» происходит загрузка исходного изображения. Далее происходит выбор фильтра с помощью соответствующей кнопки графического интерфейса. У каждого фильтра можно выбрать размер. На выбор предоставляется 3 размера для каждого фильтра: 3×3 ; 7×7 ; 9×9 элементов. Далее происходит обработка исходного изображения одним из фильтров.

Последним этапом обработанное изображение выводится на вторую сцену. Также после вывода обработанного изображения, в следующем, 3-м окне, выводится его гистограмма.

Реализация интерфейса выполнена в среде MATLAB. Особенностью языка MATLAB является то, что он хорошо работает с матрицами. На рис. 2 представлен интерфейс программы, в которой производятся дальнейшие операции, связанные с обработкой изображений [3].

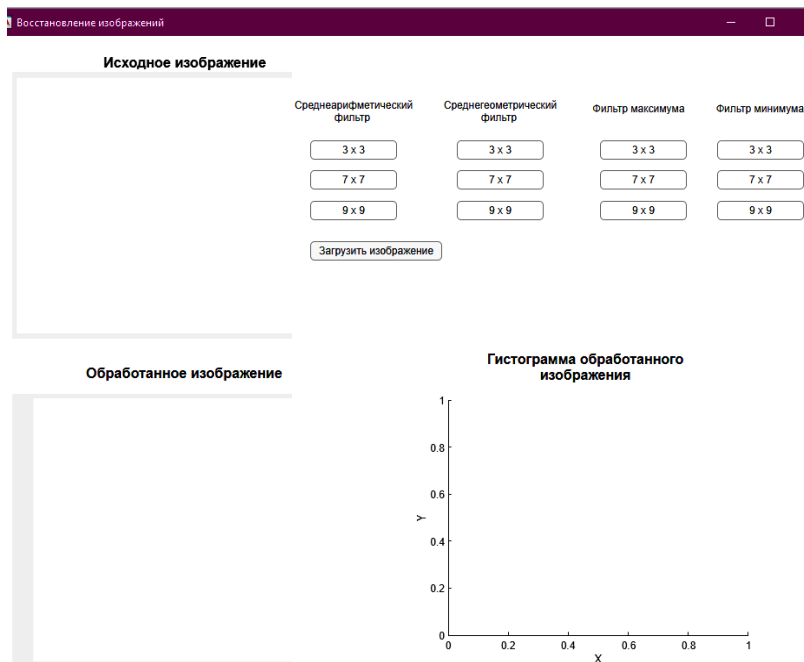


Рис. 2. Интерфейс приложения

Для начала работы приложения необходимо загрузить необходимое изображение, для этого необходимо нажать кнопку «Загрузить изображение». Изображение отобразится в следующем окне – «Исходное изображение». Далее пользователю на выбор предоставляется

4 фильтра (среднеарифметический, среднегеометрический фильтры и фильтры максимума, минимума) с различными размерами (цифровые фильтры на основе свёртки характеризуются размером группы пикселей – это размер фильтра). Выбрав необходимый фильтр, исходное изображение будет обработано, а получившийся результат отобразится в окне «Обработанное изображение». Также вместе с обработанным изображением появится его гистограмма.

Результат работы программы на примере среднеарифметического фильтра размером 3×3 элемента представлен на рис. 3.

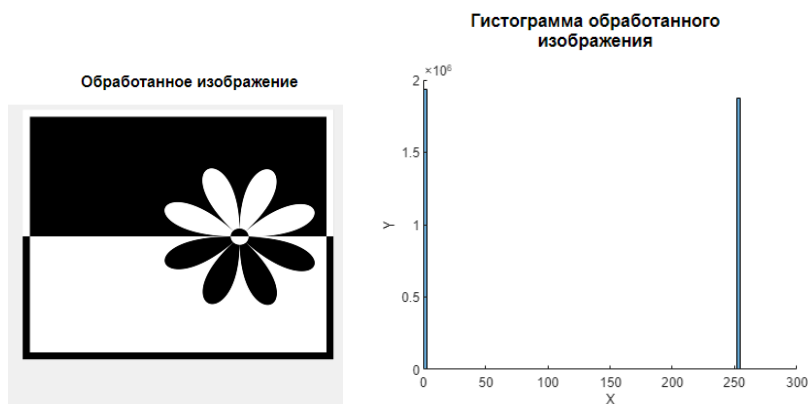


Рис. 3. Среднеарифметический фильтр размером 3×3 элемента

Из полученных результатов можно сделать вывод, что шум уменьшается путем сглаживания различий в яркости, однако при использовании большого размера фильтра изображение становится слегка размытым из-за заметного размывания перепадов яркости.

Интерфейс программы интуитивно понятен для пользователя, что предоставляет пользователю наглядное понимание, как происходит фильтрация изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Litres, 2022. – 1105 с.
2. Morphological Filters: Minimum and Maximum [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.graphicsmill.com/> (дата обращения: 01.02.2024).
3. MATLAB [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 02.02.2024).

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

А.А. Филимонцева, П.П. Снетков, студенты каф. ТУ
Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов
анализа и обработки фото- и видеоданных
в телевизионных измерительных системах
г. Томск, ТУСУР, alyssa403@mail.ru

Представлено описание основных частотных методов обработки цифровых изображений. Данные методы интегрированы в разработанный программный модуль для обработки цифровых изображений. **Ключевые слова:** обработка изображений, фильтр нижних частот, фильтр верхних частот, гомоморфный фильтр, дискретное преобразование Фурье.

Программа для использования частотных методов фильтрации может быть использована для обработки видеосигналов, фильтрации изображений, обработки данных в биологии и медицине. Частотные методы фильтрации позволяют удалить шумы или нежелательные частоты в видеосигнале, могут быть использованы для повышения четкости изображения, а также могут применяться для анализа и обработки электрофизиологических сигналов. В программу встроен ряд цифровых фильтров:

– фильтр нижних частот используется для устранения шумов и размытия, подавляя высокочастотные компоненты и пропуская только низкочастотные компоненты. Фильтр основан на гипотезе, что шумы и высокочастотные составляющие изображения несущественны для восприятия его основного содержания, так как они обычно связаны с быстрыми изменениями яркости или текстуры. Низкочастотные компоненты, в свою очередь, представляют собой плавные изменения, такие как основные структуры и детали изображения;

– фильтр верхних частот применяется для подавления низкочастотных компонент изображения, оставляя только высокочастотные. Применение этого фильтра позволяет усилить границы объектов и другие детали, которые имеют значительные изменения яркости или текстуры. Для применения фильтра верхних частот используется преобразование Фурье, которое позволяет представить его в виде суммы гармонических функций различных частотных компонентов. Применяя фильтр верхних частот к спектру изображения, подавляются низкочастотные компоненты, оставляя только высокочастотные;

– гомоморфный фильтр применяется для коррекции освещения и контрастности изображения. Он позволяет разделить изображение на низкочастотную и высокочастотную составляющие, что облегчает управление освещением объекта и его контрастностью. Использование гомоморфного фильтра особенно полезно при обработке изображений с неравномерным освещением, таких как изображения, полученные в условиях слабого освещения или с использованием различных источников света;

– дискретное преобразование Фурье (ДПФ) используется для разложения изображения на набор комплексных чисел, которые называются коэффициентами спектра. Спектр изображения представляет собой двумерный массив, где значения элементов отражают вклад каждой частоты в изображение. Быстрое преобразование Фурье – это алгоритм, который позволяет вычислять ДПФ и находить спектр изображения эффективно;

– спектр изображения является важным инструментом в области цифровой обработки изображений и представляет собой переход из пространственной области в частотную область. Использование спектра изображения позволяет анализировать его содержимое и выявлять различные характеристики, такие как частоты, границы объектов, текстуры и другие визуальные особенности. Одним из основных применений спектра изображения является фильтрация в частотной области [1–4].

Рассмотрим алгоритм работы разработанного программного модуля. На первом шаге производится запуск программы, далее происходит выбор исходного изображения, после выбора происходит загрузка исходного изображения в окно графического интерфейса и происходит выбор частоты среза для фильтра низких частот или значительные гаммы-коррекции для гомоморфного фильтра. Величина частоты среза непосредственно влияет на обрабатываемое изображение, чем меньше это значение, тем более размытым оно получается, увеличение значения гаммы-коррекции приводит к тому, что изображение становится более насыщенным (ярким). После этого происходит выбор фильтра с помощью соответствующей команды графического интерфейса, дальше происходит обработка исходного изображения одним из фильтров, выбранным на предыдущем шаге, и обработанное изображение загружается во второе окно графического интерфейса.

На рис. 1 представлен алгоритм работы программы, который по этапам показывает то, как должен работать программный модуль в конечном виде.



Рис. 1. Алгоритм работы программного модуля

Интерфейс программного модуля выполнен в пакете App Designer, который позволяет создавать приложения с интерфейсом и возможностью привязки различных элементов: команд, окон, слайдеров и т.д. к написанному коду в MATLAB. На рис. 2 представлен интерфейс программного модуля, в котором производятся дальнейшие операции, связанные с обработкой изображений в частотной области.

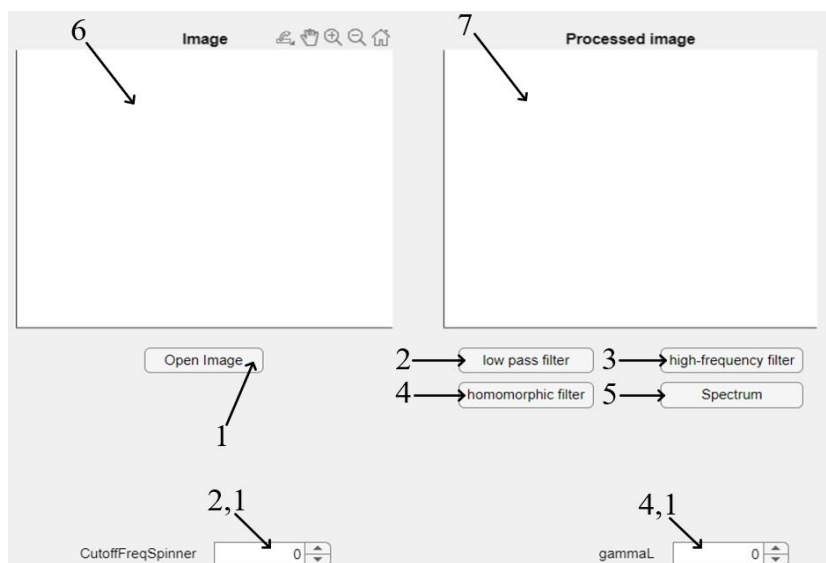


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения

Цифровыми указателями на рис. 2 показаны основные окна и команды, необходимые для обработки изображений. Они имеют следующие обозначения:

1 – показывает команду загрузки изображения, которое далее будет показано в окне б и над которым будут производиться операции по обработке в частотной области;

2 – показывает команду обработки изображения частотным фильтром, которое далее, как и все обработанные фильтрами (2 – фильтр нижних частот; 3 – фильтр верхних частот; 4 – гомоморфный фильтр; 5 – спектр изображения) изображения, будет показан в окне 7;

2,1 – показывает окно ввода частоты среза для низкочастотного фильтра (2);

4,1 – показывает окно ввода значения гамма-коррекции для гомоморфного фильтра (4).

Результат работы программного модуля на примере гомоморфного фильтра представлен на рис. 3.

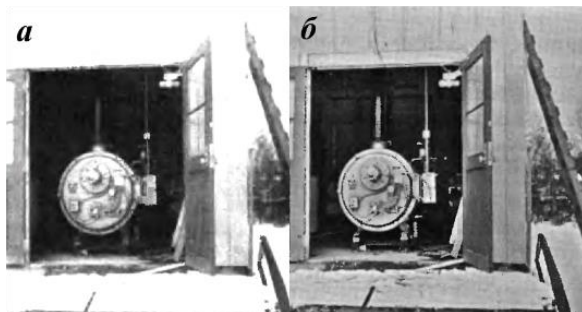


Рис. 3. Результат применения гомоморфного фильтра (а) и пример отфильтрованного изображения (б)

Частотная обработка изображений является важным инструментом в области компьютерного зрения и обработки изображений, позволяющим выделять и анализировать различные пространственные частоты и текстуры в изображении. Программный модуль позволяет визуализировать обработку изображений, что помогает пользователю лучше воспринимать результаты фильтрации изображения и вносить необходимые изменения в их обработку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – 2012. – 1105 с.

2. Ахмеров Д.М. Методика автоматизированного проектирования цифровых фильтров обработки изображений // XI науч.-практ. конф. с междунар. участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых: матер. конф. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – Т. 18. – С. 32.

3. Охотников С.А. Особенности гомоморфной фильтрации контуров изображений // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. – 2021. – С. 189–191.

4. Тимофеев А.Л. и др. Использование спектрального подхода при обработке изображений и произвольных данных // Информационно-управляющие системы. – 2022. – № 4 (119). – С. 2–11.

УДК 681.786.23

ДАТЧИКИ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ГЛУБИН ПРОСТРАНСТВА

С.А. Забуга, И.Д. Мусихин, студенты;

В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ilia.d.musikhin@tusur.ru

Проведен обзор видов современных датчиков, используемых для измерения расстояния и построения карт глубин пространства. Приведены особенности работы датчиков, на которые следует ориентироваться при их выборе.

Ключевые слова: карта глубины, Structured Light камера, Time-of-Flight камера, Depth from Stereo камера, Light Field камера, LiDAR.

Во многих областях, таких как промышленность [1], игровая индустрия [2] или навигация [3], стоит задача получения карт глубин пространства для измерения дальности до объектов. В техническом зрении карта глубины – это массив обычно той же размерности, что и исходное изображение, в ячейках которого вместо яркости содержится расстояние [4]. На практике часто применяют изображение в формате RGB-D – это четырехканальное изображение, в трех каналах которого записано цветное изображение, а в четвертом – карта глубины.

Structured Light камера – простой датчик для формирования карты глубины, алгоритм работы которого заключается в проецировании точек или линий по заранее определенному эталону. Объект, находящийся в область проекции, создает искажения эталона, которые фиксирует камера. По смещению между реальными и эталонными точками/линиями рассчитывается карта глубины [5]. Для использования Structured Light камеры существует ряд ограничений, например, появляются слепые зоны при большой базе между камерой и проектором, возникают засветы от иных источников, появляется эффект смазанности из-за теней от объекта. Из-за этих ограничений Structured Light камеры используются при малых дальностях до объекта и стабильном фоновом освещении [6].

Time-of-Flight (ToF) камера – устройство измерения дальности, основанное на измерении времени прохождения светом пути до объ-

екта и обратно. В них объект подсвечивается модулированным источником света, а затем измеряется фазовый сдвиг между прямым и отраженным светом. Для расчета дальности до объекта, от которого отразился свет, необходимо знать скорость света, его длину волны и время накопления заряда на матрице сенсора. Измерение малых расстояний с помощьюToF-камеры достигается путем установки в систему синхронизации с тактовой частотой не менее 1 ГГц.

Устройством подсвета обычно служит светодиод или твердотельный лазер ближнего ИК-диапазона (около 850 нм). Прямоугольная модуляция получила наибольшее распространение вToF-системах, так как ее проще реализовать с помощью цифровых преобразователей. Матрица сенсора или датчик должны иметь максимальную спектральную чувствительность на длине волны устройства подсвета для того, чтобы принимать свет с наименьшей погрешностью и преобразовывать его в электрический сигнал [7].

Отметим, чтоToF-система почти не зависит от фонового освещения, а при использовании нескольких сенсоров с различным временем накопления заряда, повышается точность формирования карты глубины [8].

Depth from Stereo камера – это датчик расстояния, использующий два сенсора, разнесенные на определенное расстояние (базу). Системы, основанные на Depth from Stereo камерах, работают в соответствии с (1) и вычисляют положение каждой точки на изображениях с каждой камеры в пространстве, тем самым строя карту глубины [9].

$$d(k) = f \frac{b}{I_p \cdot \Delta n}, \quad (1)$$

где $d(k)$ – дальность в точке k ; f – фокусное расстояние объективов (мм); b – база стереосистемы (м); I_p – линейный размер пикселя (мкм); Δn – значение диспаратности (в пикселях) между точкой k на левом и правом кадрах.

Для точного построения карт глубин требуется высокий контраст в наблюдаемой сцене, а также по формулам (2) и (3) требуется рассчитать эффективное расстояние построения карты глубины, которое зависит от базы:

$$d_{\max} = f \cdot (b / I_p), \quad (2)$$

$$d_{\min} = f \cdot \frac{b}{I_p \cdot w}, \quad (3)$$

где d_{\max} и d_{\min} – максимально и минимально возможная измеряемая дальность (м) соответственно; w – разрешение изображения по горизонтали (в пикселях).

Light Field камера – менее всего распространённый датчик построения карты глубины. Light Field камера записывает в каждом пикселе интенсивность и направление входящего света, поэтому получаемое изображение возможно перефокусировать и восстановить информацию о глубине резкости. На практике такая система реализуется (рис. 1) в виде массива микролинз, расположенных перед матрицей камеры [10].

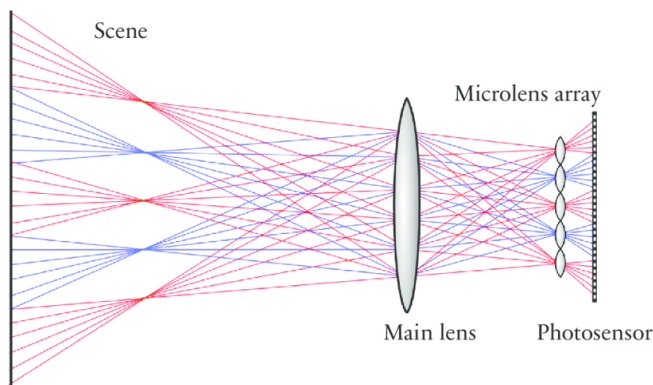


Рис. 1. Захват светового поля с помощью матрицы микролинз и основной линзы. Каждая микролинза записывает небольшой вид сцены [11]

Light Detection and Ranging (LiDAR) – система измерения дальности и построения карт глубин, произошедшая от активных лазерных дальнометров [12]. Работает LiDAR по принципу ToF-камер – на основе измерения времени прохождения света расстояния до объекта в прямом и обратном направлениях с дальнейшим вычислением дальностей. Используя LiDAR с круговым обзором, можно получить изображение с углом видения 360° с хорошо просматриваемыми объектами в плоскости сканирования [13]. Технология твердотельных лидаров позволила отказаться от подвижных частей и снизила их стоимость, а также обеспечила перспективу для развития беспилотного транспорта [14, 15]. Следует обратить внимание на то, что сканирование матрицы работает с плавающим затвором, из-за чего появляются искажения быстродвижущихся объектов.

Для получения точных карт глубин пространства следует правильно подбирать тип устройств и ориентироваться на такие параметры, как зависимость их работы от фонового освещения, максимального и минимального измеряемого расстояния, регулировки диапазона измерения дальностей, требований к источнику освещения, затраты

ресурсов для формирования карты глубины и их стоимость. Карты глубин пространства, построенные датчиками, описанными выше, широко применяются в различных разработках, в которых требуется измерять дальность до объекта и его геометрические характеристики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10200 в ТУСУРе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Devagiri J.S. et al. Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges // *Expert Systems with Applications*. – 2022. – P. 118002.

2. Vijayanagar K.R. Refinement of depth maps generated by low-cost depth sensors / K.R. Vijayanagar, M. Loghman, J. Kim // 2012 International SoC Design Conference (ISOCC). – IEEE, 2012. – P. 355–358.

3. Angelopoulos A.N. et al. Enhanced depth navigation through augmented reality depth mapping in patients with low vision // *Scientific reports*. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 11230.

4. Hartley R., Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision* / R. Hartley, A. Zisserman. – Cambridge university press, 2003.

5. Giancola S. et al. Metrological qualification of the Orbbec Astra S™ structured-light camera // *A Survey on 3D-Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies*. – 2018. – P. 61–69.

6. Smisek J. 3D with Kinect / J. Smisek, M. Jancosek, T. Pajdla // *Consumer depth cameras for computer vision: Research topics and applications*. – 2013. – P. 3–25.

7. Su S. et al. Deep end-to-end time-of-flight imaging // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2018. – P. 6383–6392.

8. Wermke F. Interference avoidance for two time-of-flight cameras using autonomous optical synchronization / F. Wermke, T. Wübbenhorst, B. Meffert // 2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). – IEEE, 2020. – P. 586–595.

9. Giancola S. Metrological Qualification of the Intel D400™ Active Stereoscopic Cameras / S. Giancola, M. Valenti, R. Sala // *A Survey on 3D-Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies*. SpringerBriefs in Computer Science. – Springer, 2018. Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-91761-0_6.

10. Lin R.J. et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging // *Nature nanotechnology*. – 2019. – Vol. 14, No. 3. – P. 227–231.

11. Petry C. Analysis of preprocessing and rendering light field videos // *FHWS Science Journal*. – 2016. – Vol. 3, No. 2. – P. 58–68.

12. Johnson K.M. et al. High-resolution airborne Light Detection and Ranging data, ethics and archaeology: Considerations from the northeastern United States // *Archaeological Prospection*. – 2021. – Vol. 28, No. 3. – P. 293–303.

13. Скориков В.Р. Беспилотные автомобили: принцип работы оборудования и недостатки // Актуальные проблемы теории и практики развития научных исследований. – 2022. – С. 60.

14. Peng X. et al. Modelling of the biodiversity of tropical forests in China based on unmanned aerial vehicle multispectral and light detection and ranging data // International Journal of Remote Sensing. – 2021. – Vol. 42, No. 23. – P. 8858–8877.

15. Li N. et al. A Progress Review on Solid- State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors // Laser & Photonics Reviews. – 2022. – Vol. 16, No. 11. – P. 2100511.

ПОДСЕКЦИЯ 1.5

СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

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

УДК 621.376.32

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ОШИБОК ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В КАНАЛЕ С ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫМИ ЗАМИРАНИЯМИ

Н.Г. Калашиникова, Е.В. Ломаков, студенты каф. РТС;

К.В. Диноченко, студент каф. ТОР

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, зав. каф. ТОР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, nat_10_00@mail.ru*

Рассмотрен алгоритм оценки устранения ошибок временной и частотной синхронизации при приеме ЛЧМ-сигналов под названием Reduced Set. Предложен модифицированный алгоритм Reduced Set, позволяющий повысить вероятность верной демодуляции символов при наличии многолучевого канала распространения радиоволн и ошибок временной и частотной синхронизации.

Ключевые слова: LoRa, линейная частотная модуляция, reduced set, IoT.

Сегодня интернет вещей (Internet of Thing, IoT) является одним из наиболее многообещающих направлений в области использования информационных технологий для создания продуктов и услуг будущего [1]. Для обеспечения коммуникации IoT устройств специально был разработан протокол связи Low-power Wide-area Network (LoRaWan), в частности, технология под названием Long Range (LoRa), использующая линейную частотную модуляцию (ЛЧМ) [2]. Однако сигналы с ЛЧМ более подвержены ошибкам временной и частотной синхронизации, в этом случае актуально обратиться к алгоритму reduced set (RS) [3, 4], который позволяет существенно повысить надежность системы связи при наличии данных ошибок.

RS-модуляция подразумевает под собой ввод защитных интервалов за счет уменьшения количества символов модуляции. Расстояние между символами модуляции можно вычислить по формуле

$$g_{i_{rs}} = 2^{RS} - 1, \quad (1)$$

где RS – коэффициент модуляции RS.

ЛЧМ-сигнал с применением подхода RS можно записать в виде

$$\mathbf{x}[n] = \exp\left(\frac{li \cdot \pi \cdot (n^2 + 2 \cdot k_{RS} \cdot n)}{N}\right), n = 0 \dots N-1, \quad (2)$$

где N – количество отсчетов в одном сигнале; $k_{RS} = l \cdot 2^{RS}$ – значение

RS; $l = 0 \dots \frac{2^{SF}}{2^{RS}}$ – количество символов, отданных под защитные интервалы; SF – коэффициент расширения спектра, обычно принимает значения от 7 до 12.

Демодуляция ЛЧМ с подходом RS практически идентична демодуляции без подхода RS за исключением того, что поиск отсчета с максимальным значением производится в каждом интервале Фурье преобразования. Тогда демодулированный символ можно представить следующим образом:

$$\hat{k}_{RS} = l \cdot 2^{RS} \mid \hat{k} \in l \cdot 2^{RS} \pm \frac{2^{RS}}{2}. \quad (3)$$

В данной работе предлагается рассчитывать среднее значение в каждом интервале Фурье-преобразования. В отличие от поиска максимума, данный метод позволит снизить вероятность битовой ошибки в условиях многолучевого распространения сигнала при наличии ошибок синхронизации, так как соседние пики будут вносить вклад в вычисления среднего значения.

Расчет среднего значения можно произвести по следующей формуле:

$$\mathbf{m}[r] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |\mathbf{s}[n]|}{N}, \quad n \in l \cdot 2^{RS} \pm \frac{2^{RS}}{2}, \quad (4)$$

где $\mathbf{s}[n]$ – сигнал после процедуры преобразования Фурье.

После чего производится поиск интервала с максимальным значением, который впоследствии необходимо умножить на коэффициент 2^{RS} для определения закодированного символа:

$$\hat{m}_{RS} = \arg \max(\mathbf{m}[l]) \cdot 2^{RS}. \quad (5)$$

Для сравнения классического алгоритма RS с предлагаемым на рис. 1 представлена зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при значении $RS = 4$.

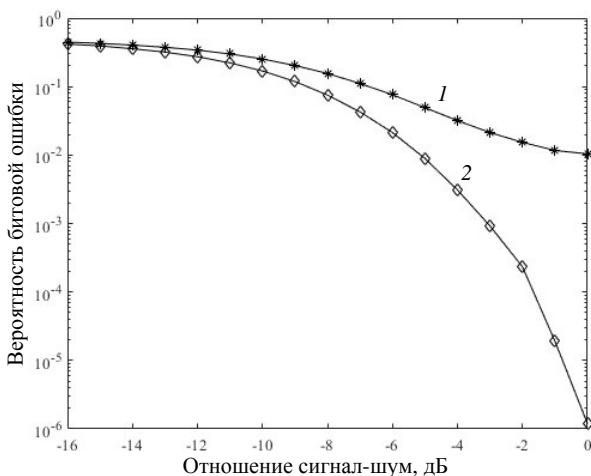


Рис. 1. Сравнение классического алгоритма RS с предлагаемым

Из рис. 1 видно, что предложенный подход (кривая 2) превосходит классический (кривая 1): при отношении сигнал/шум 0 дБ вероятность битовой ошибки классического подхода с RS больше, чем у предлагаемого.

ЛИТЕРАТУРА

1. LoRa – A survey of recent research trends / M. Saari, A. Muzaffar bin Baharudin, P. Sillberg, S. Hyrynsalmi, W. Yan // 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). – 2018. – P. 872–877.
2. Analytical and Simulation study for LoRa Modulation / H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Mona-Cruz, G. Rouyer // 2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT). – 2018. – P. 655–659.
3. Пат. 20140219329A1 US, МПК H04B I/66. Low complexity, low power and long range radio receiver / Seller O., Sornin N. (FR), заявл. 31.01.2014, опубл. 07.08.2014.
4. Пат. 10305535B2 US, МПК H04B I/66. Low complexity, low power and long range radio receiver / Seller O., Sornin N. (FR), заявл. 12.06.2017, опубл. 28.05.2019.

УСТРАНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СПЕКТРЕ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

*К.В. Диноченко, студент каф. ТОР; Е.В. Рогожников, зав. каф. ТОР, к.т.н.; Н.Г. Калашикова, студентка каф. РТС
г. Томск, ТУСУР, k.dinochenko@yandex.ru*

Предложен метод борьбы с неравномерностью спектра с линейной частотной модуляцией при применении подхода Reduced Set.

Ключевые слова: Reduced Set, линейная частотная модуляция, неравномерность спектра.

При создании сетей с высокой плотностью пользователей, в соответствии с концепциями частотного планирования, спектральную эффективность и качество обслуживания можно обеспечить путем повторного использования частотного ресурса [1]. При этом применение подхода Reduced Set (RS) при формировании и обработки сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) приводит к появлению в спектре сигнала неравномерностей, которые проявляются в виде характерных пиков с большой амплитудой, в результате чего повторное использование канала становится невозможным.

RS-модуляция подразумевает под собой ввод защитных интервалов за счет уменьшения количества символов модуляции [2, 3]. Данный подход обеспечивает большую помехоустойчивость по сравнению с классическими видами модуляции, однако вместе с тем приносит изменения фазы во временной области, порождающие нежелательные пики в спектре сигнала.

Устранить данные неравномерности возможно с помощью обнуления пиков на определенных позициях, которые рассчитываются исходя из коэффициента расширения спектра SF , коэффициента модуляции RS . Однако данный метод является вычислительно сложным. В таком случае предлагается устранять спектральные искажения путем добавления фазовых сдвигов к сигналу. Фазовые сдвиги могут принимать только определенные дискретные значения, которые можно вычислить по формуле (1):

$$X_1 \sim U\left(0, \frac{N}{Nb_{rs}}\right), X_2 \sim U(0, Nb_{rs}), R = X_1 \cdot Nb_{rs} + X_2 \frac{N}{Nb_{rs}}, P = \frac{R \cdot \pi}{N}, \quad (1)$$

где N – количество отсчетов в одном сигнале; Nb_{RS} – количество бит в одном символе RS-модуляции; P – фазовое смещение.

Исходя из выражения (1), RS-модулированный сигнал со смещением фазы представляет собой

$$\begin{aligned} \tilde{s}_l[n] &= s_l[n] \cdot \exp(i l \cdot n \cdot P) = \exp\left(i l \cdot \pi \cdot \left(n^2 + 2 \cdot k \cdot n\right) / N\right) \exp(i l \cdot l \cdot P) = \\ &= \exp\left(\frac{i l \cdot \pi \cdot n^2 + i l \cdot \pi \cdot 2 \cdot k \cdot n + i l \cdot l \cdot R \cdot \pi}{N}\right) = \exp\left(\frac{i l \cdot \pi \cdot \left(n^2 + 2 \cdot k \cdot n + l \cdot R\right)}{N}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tilde{s}_l[n]$ – модулированный сигнал со смещенной фазой; $s_l[n]$ – модулированный сигнал; l – номер сигнала в посылке; $n = 0 \dots N - 1$.

Выражение (2) выведено экспериментально и обеспечивает устранение нежелательных пиков в спектре сигнала.

На рис. 1 приведены спектры с применением подходов, устраняющих нежелательные спектральные пики: обнуление и фазовое смещение для сигналов, модулируемых с помощью частотного и временного сдвигов.

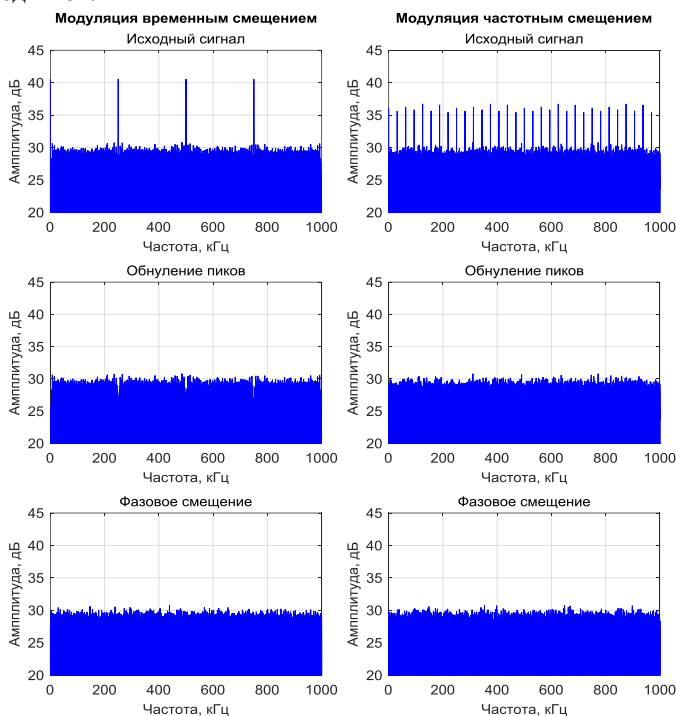


Рис. 1. Устранение спектральных пиков с помощью обнуления и изменения фазы

Согласно рис. 1, устранение спектральных пиков с помощью изменения фазы сигналов полностью выравнивает спектр независимо от способа формирования сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулов А.С. Частотно-территориальное планирование сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / А.С. Викулов, А.И. Парамонов // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 35–48.

2. Пат. 20140219329A1 US, МПК H04B I/66. Low complexity, low power and long range radio receiver / Seller O., Sornin N. (FR). заявл. 31.01.2014, опубл. 07.08.2014.

3. Пат. 10305535B2 US, МПК H04B I/66. Low complexity, low power and long range radio receiver / Seller O., Sornin N. (FR). заявл. 12.06.2017, опубл. 28.05.2019.

УДК 621.396.96

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБНАРУЖЕНИЯ PRACH-СИГНАЛА GSM 900

Р.А. Порваткин, студент ПИИШ

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ПИИШ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, porvatkin2001@gmail.com*

Представлены результаты разработки модели обнаружения сигнала PRACH GSM 900. Моделирование проведено при разных значениях порога детектирования сигнала. Получено, что наилучший коэффициент порога равен 11.

Ключевые слова: корреляция, помехи, сигнал, шум, ложная тревога, порог, моделирование.

Существует проблема в радиолокации и системах связи, когда наблюдается либо смесь сигнала и шума, либо только шум. Задача исследователя состоит в том, чтобы, используя определенный алгоритм обнаружения сигнала, выбрать правильное решение по наблюдаемым данным о наличии или отсутствии сигнала [1].

Данная модель разработана для обнаружения PRACH-сигнала GSM 900 на фоне помех. В качестве рабочих характеристик алгоритма обнаружения используется вероятность ложной тревоги и пропуска сигнала.

Данная работа проводилась при отношении сигнал/шум, равном 5, -5 и 0 дБ.

Суть модели заключается в том, что с помощью функции `gsmUplinkConfig` генерируется идеальный (состоящий только из

Access Burst) восходящий сигнал и произвольный восходящий сигнал (состоящий из Access Burst и Normal Burst [каких-то произвольных информационных символов]), после чего они записываются в TDMA-кадр с помощью функции «gsmFrame». Далее эти сигналы коррелируются между собой. Выбрав пороговое значение корреляции, можно будет детектировать нужный GSM-сигнал на фоне шума.

Корреляция производится не по всему Access Burst, а по начальным extended tail bits и synchronization bits (поскольку эти биты всегда одинаковые, это прописано в стандарте GSM 05.02 [2]). В этом случае корреляция будет положительная и сигнал легко детектировать [3].

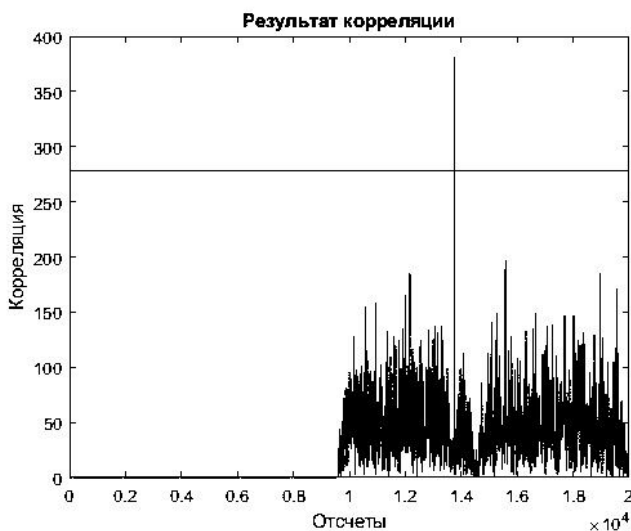


Рис. 1. Корреляция эталонного сигнала и случайного сигнала GSM с АВ, при С/Ш = 5 дБ

На рис. 1 выше представлено значение корреляции для эталонного сигнала Access Burst и одного TDMA-кадра, состоящего из 1 Access Burst и 7 Normal Burst. Порог был рассчитан как среднее значение всех точек по модулю, умноженное на коэффициент 11. Коэффициент был выбран путем подбора, в ходе проведения серии экспериментов, а именно по 10 000 модуляций для каждой ситуации. Результаты моделирования представлены на таблицах ниже.

Вначале была произведена модуляция только для шума, без сигнала, чтоб определить порог корреляции, при котором у нас будут отсутствовать ложные срабатывания на шум, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость ложных срабатываний на шум

Порог	С/Ш, дБ		
	5	0	-5
9	3	3	7
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0

На табл. 2 представлены результаты моделирования для определения зависимости ложных срабатывания от порога корреляции.

Таблица 2

Зависимость ложных срабатываний на сигнал + шум

Порог	С/Ш, дБ		
	5	0	-5
9	282	246	87
10	37	19	6
11	2	1	1
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0

Далее были произведены моделирования для расчета количества пропуска сигнала при тех же отношениях сигнал/шум и порога корреляции, результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость пропуска сигнала

Порог	С/Ш, дБ		
	5	0	-5
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	9
12	0	0	295
13	0	2	2397
14	0	235	6922

В результате работы создана математическая модель, которая позволяет обнаружить PRACH-сигнал стандарта GSM 900. Также по результатам работы выбран наилучший порог корреляции, а именно

11, при этом пороге мы получаем минимальные пропуски сигналов с минимальными ложными срабатываниями.

Дальнейшая цель работы заключается в улучшении алгоритмов обработки сигнала для повышения точности и скорости обнаружения.

Также возможны исследования по оптимизации параметров модели для достижения оптимального соотношения между вероятностью ложной тревоги и пропуска сигнала. Дополнительно, можно рассмотреть применение модели в различных областях, где требуется обнаружение сигналов на фоне помех, например в радиолокации или системах связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов П.С. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
2. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Multiplexing and multiple access on the radio path (GSM 05.02) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0502/05.00.00_60/gsmts_0502v050000p.pdf, свободный (дата обращения: 12.01.2024).
3. Афанасьев А.А. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.А. Афанасьев, А.А. Рыболовлев, А.П. Рыжков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 356 с.

УДК 621.396.41

АНАЛИЗ ИСПРАВЛЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛЯРНЫХ КОДОВ ДЛЯ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВЫХ ОШИБОК

*Г.Н. Шалин, А.С. Шинкевич, магистранты;
Д.А. Покаместов, доцент каф. ТОР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ТОР, shalingn1120@gmail.com*

Представлены результаты моделирования полярных кодов и определены скорости кодирования, позволяющие обеспечить требуемую вероятность ошибок на выходе декодера при различном значении отношения сигнал/шум. Также приведены краткие теоретические данные по полярному кодированию и декодированию.

Ключевые слова: полярные коды, скорость кода, вероятность ошибок.

Полярные коды – несистематические блочные коды, предложенные Ариканом. Размер сообщения K составляет от 1 до $N-1$, $N = 2^n$. Исправляющая способность полярного кода зависит от скорости кода $R = K/N$. Формирование кодового слова сводится к произведению

входных бит на генераторную матрицу, данный процесс можно представить следующим образом [1]:

$$\mathbf{d} = \mathbf{u}\mathbf{G}_m, \quad u_i = 0, \quad i \in \mathbf{F}; \quad u_j = b_k, \quad j \notin \mathbf{F}, \quad (1)$$

где $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_N]$ – кодовое слово, \mathbf{u} – поток бит, поступающий на вход умножителя, $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_K]$ – биты сообщения, $\mathbf{F} = [f_1, \dots, f_{N-K}]$ – последовательность индексов замороженных бит.

Образующей матрицей полярного кода является матрица Арика на размер (2,2) [2]:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Элементарное полярное преобразование сводится к разделению подканалов по критерию помехозащищенности на более и менее надежные каналы. Процесс полярного преобразования для $N = 2$ представлен на рис. 1 [3].

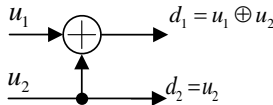


Рис. 1. Процесс полярного преобразования для $N = 2$

Декодирование выполняется по одному из трех алгоритмов. Это алгоритм последовательного исключения SC (Successive Cancellation) [4], списочный SCL (Successive Cancellation List) [5] и стековый с последовательным исключением SCS (Successive Cancellation Stack) [6]. Декодирование битов на приемной стороне проводится на основании мягких оценок LLR (Log-Likelihood Ratio).

Математическая модель описывает упрощенную систему связи, использующую полярное кодирование (рис. 2). На передающей стороне формируется сообщение, к которому добавляется CRC (Cyclic Redundancy Check) [7]. Далее биты последовательно поступают в блок полярного кодирования, перемежения и на модулятор, в качестве которого используется BPSK (Binary Phase-Shift Keying). После этого сигнал поступает в модель канала с аддитивным белым гауссовским шумом. На приемной стороне сигнал проходит демодуляцию, где рассчитываются значения LLR, после чего выполняется операция выравнивания скоростей. Далее проводится декодирование методом SCL. Полученные биты сравниваются с сообщением, сформированным в передатчике, и рассчитывается значение коэффициента битовых ошибок BER (Bit Error Rate).

Моделирование проводилось для различных скоростей кода (от 150/1024 до 950/1024) при длине кодового слова 1 024 бита. Полу-

чившиеся зависимости сохранялись для последующей обработки и интерпретации.

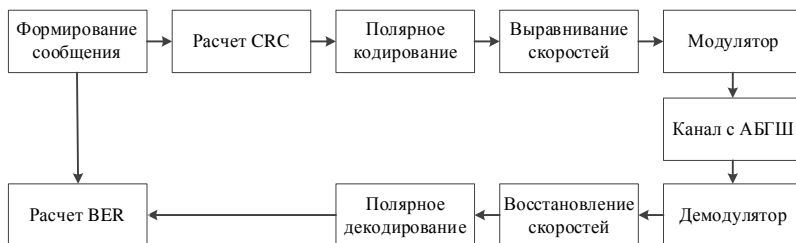


Рис. 2. Схема разработанной модели

В качестве результатов моделирования на рис. 3 приведены зависимости необходимой скорости кода для достижения заданной вероятности битовой ошибки P_e (10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5}) при различном отношении сигнал/шум (ОСШ).

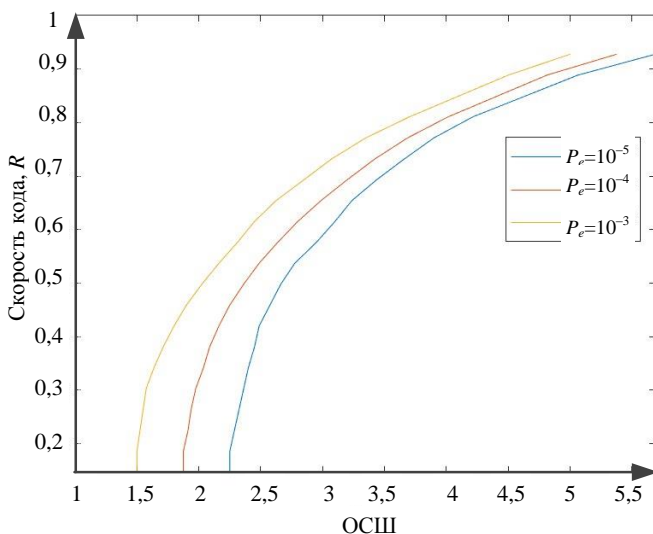


Рис. 3. Зависимость скорости кода от ОСШ

Представленные зависимости демонстрируют исправляющую способность полярных кодов при различных скоростях кодирования. Из результатов моделирования видно, что при увеличении скорости кода отношение сигнал/шум, необходимое для достижения заданной

вероятности битовой ошибки, увеличивается. Полученные результаты могут быть использованы для выбора необходимых параметров кода при адаптивной работе систем связи. Приведенные зависимости также могут применяться для составления таблиц сигнально-кодовых конструкций на основе полярных кодов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00172/, <https://rscf.ru/project/24-29-00172/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mori R., Tanaka T. Performance and construction of polar codes on symmetric binary-input memoryless channel // 2009 IEEE International symposium on information theory. – IEEE, 2009. – P. 1496–1500.
2. Arıkan E. A performance comparison of polar codes and Reed-Muller codes // IEEE Communication Letters. – 2008. – Vol. 12, No. 6. – P. 447–449.
3. Arıkan E. Channel polarization: A method for construction capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on information Theory. – 2009. – T. 55, No. 7. – P. 3051–3073.
4. Pedarsani R. Polar Codes: Construction and Performance Analysis // Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), June 2011. – 48 p.
5. Chen K. List successive cancellation decoding of polar codes / K. Chen, K. Niu, J.R. Lin // Electron. Lett. – 2012. – Vol. 48, No. 9. – P. 500–501,
6. Niu K. Stack decoding of polar codes / K. Niu, K. Chen // Electronics letters. – 2012. – Vol. 48, No. 12. – P. 695–697.
7. 3GPP TS. 36.212 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Multiplexing and channel coding (Release 15) V15.2.1 (2018-07) [Электронный ресурс]. – https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136212/15.02.01_60/ts_136212v150201p.pdf, открытый доступ (дата обращения: 28.02.2024)/

УДК 004.94

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕНИЯ СПЕКТРА В СИСТЕМЕ МИМО АЛАМОУТИ

К.А. Труханенко, студент каф. ТОР

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ТОР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kristina.trukhanenko@mail.ru*

Описано исследование помехоустойчивости многоантенной системы, применяемой со схемой Аламоути, OFDM-технологией и расширением спектра, а также одноантенной системой с OFDM и расширением спектра. Было показано влияние идеальной и реальной оценки канала передачи на помехоустойчивость системы. Основной метрикой оценки качества выступает вероятность битовой ошибки.
Ключевые слова: Multiple Input Multiple Output (MIMO), Zero Forcing (ZF), Space Time Block Code (STBC), Аламоути.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) является технологией, которая используется в беспроводных коммуникациях для улучшения пропускной способности и надежности передачи данных [1–3]. Применение кодирования Аламути [4] позволяет обеспечить передачу данных при низком отношении сигнал/шум (ОСШ) в беспроводных сетях. Данное кодирование применяется в MIMO-архитектурах, чтобы увеличить помехоустойчивость. MIMO Аламути применяется совместно с OFDM [5] (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением). Помимо MIMO Аламути, повышенная помехоустойчивость систем связи достигается с помощью кодового расширения спектра. Один из способов – кодовое расширение Адамара. Для передачи информации в беспроводных сетях зачастую используется OFDM-технология [5]. Однако ее применение затруднено при низком ОСШ, так как в OFDM используется эквалайзирование по методу Zero-Forcing (ZF), который приводит к увеличению шума. Целью данной работы является получение зависимостей вероятности битовой ошибки от ОСШ для MIMO-системы со схемой Аламути и расширением спектра в сравнении с одноантенной OFDM-системой и расширением спектра при идеальной и реальной оценке канальной матрицы.

В работе используется канал Райса с тремя лучами и аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Рассмотрим два сценария – оценка канала полностью соответствует используемому каналу (идеальная оценка) и оценка вычисляется по переданной преамбуле (реальная оценка). На рис. 1 показаны кривые для первого сценария.

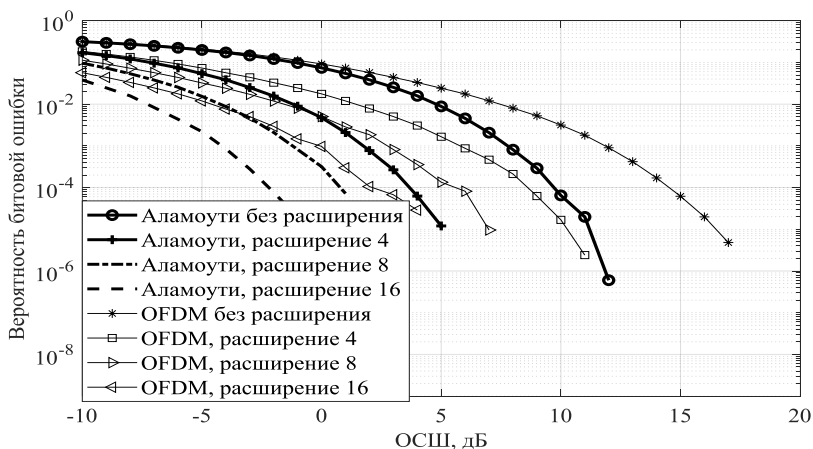


Рис. 1. Вероятность битовой ошибки для первого сценария

В каждом сценарии рассмотрены две схемы передачи – ММО Аламути с OFDM с расширением и без расширения спектра, а также одноантенная OFDM-система с расширением и без расширения. В качестве модуляции используется BPSK, а коэффициент расширения будет изменяться от 4 до 16.

Аламути с расширением 4 должно обеспечивать такую же помехоустойчивость, как применением OFDM с расширением 8. Из рис. 1 можно заметить, что при Аламути с расширением 4 вероятность битовой ошибки на порядок меньше, чем при OFDM с расширением 8, в условиях ОСШ 5 дБ. Также отметим, что при ОСШ 5 дБ вероятность битовой ошибки для Аламути с расширением 4 на 3 порядка меньше, чем для OFDM без расширения. Построим кривые для второго сценария на рис. 2.

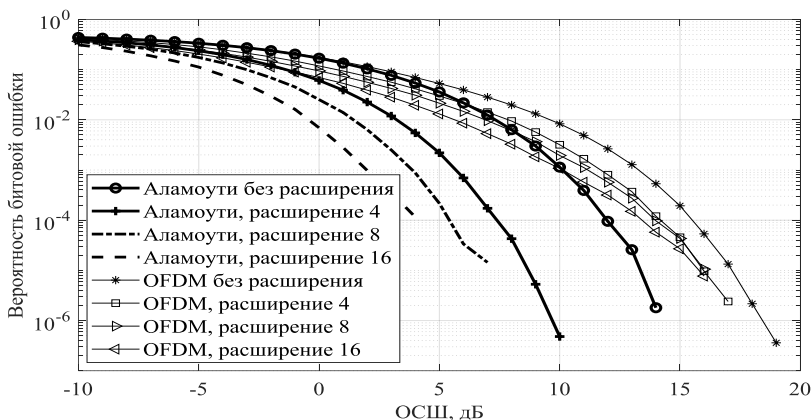


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки для второго сценария

Из рис. 2 можно заметить, что применение OFDM с расширением, равным 16, обеспечивает на порядок меньшую вероятность битовой ошибки по сравнению с OFDM без расширения, в то время как при идеальной оценке вероятность битовой ошибки была меньше на 3 порядка. При использовании Аламути с расширением, равным 4, вероятность битовой ошибки на 3 порядка меньше, чем в случае с Аламути без расширения при ОСШ, равном 10 дБ.

Заключение. В данной работе были рассмотрены две схемы передачи сигналов. Одна включала себя ММО-Аламути с OFDM-технологией с расширением спектра, другая представляла собой одноантенную OFDM-систему с расширением спектра. Полученные результаты демонстрируют, что высокой помехоустойчивости в условиях многолучевого канала при низком ОСШ можно добиться использо-

ванием комбинации таких методов, как ММО Аламути совместно с расширением спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2007. – 1104 с.
2. Goldsmith A. Capacity limits of MIMO channels / A. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath // IEEE Journal on selected areas in Communications. – 2003. – P. 684–702.
3. Tarokh V. Space-time block coding for wireless communications: Performance results / V. Tarokh, H. Jafarkhani, A.R. Calderbank // IEEE Journal on selected areas in communications. – 1999. – P. 451–460.
4. Alamouti S.M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // IEEE Journal on selected areas in communications. – 1998. – P. 1451–1458.
5. Nee R.V. OFDM for wireless multimedia communications / R.V. Nee, R. Prasad. – Boston: Artech House, 2000. – P. 33–92.

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

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

УДК 615.47

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В МЕДИЦИНСКИХ РОБОТАХ

Р.А. Емельянов, З.В. Рыжаккин, студенты каф. КСУП

*Научный руководитель В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, skumbrialatinskaya@yandex.ru*

Рассмотрены примеры применения технического зрения в современных медицинских роботах и сделан обзор некоторых из них.

Ключевые слова: робот, автономный, техническое зрение, операция, алгоритм, медицина.

На протяжении уже нескольких десятилетий в области медицины для проведения операций применяется практика использования роботоассистированных систем, таких как da Vinci. Такие системы, состоящие из рук-манипуляторов, управляются хирургом-оператором и позволяют проводить операции более точно при минимальной инвазивности лапароскопической операции. Но также существуют и полностью автономные системы, которые начали развиваться сравнительно недавно. Данные типы роботов не требуют вмешательства человека (или требуют его минимального вмешательства) при проведении операции или процедуры, применяя для этого алгоритмы технического зрения. О некоторых из таких роботов и пойдет речь в данной статье.

Робот Smart Tissue Autonomous Robot (STAR). Одним из значимых представителей автономной хирургической робототехники является робот STAR, спроектированный в США в университете Джона Хопкинса. Данный робот разрабатывается для проведения анастомоза, процедуры по восстановлению целостности кишечника путем сшивания его двух частей, которая является достаточно сложной даже для опытных хирургов. Робот STAR использует алгоритмы технического зрения для определения плана по наложению швов, который должен быть одобрен хирургом-оператором. Робот способен отслеживать положение кишечника постоянно и, в случае его измене-

ния, изменить план по наложению швов, который также утверждается хирургом-оператором. Скорее всего, робот не сможет обеспечить полностью автономное проведение операции, так как за роботом и его действиями необходимо вести наблюдение, которое может осуществлять опытный хирург. Он будет наблюдать за процессом операции, и в случае сбоя или других непредвиденных ситуаций сможет предпринять необходимые действия для корректировки работы робота.

Робот Veebot. Еще одним примером инновационной робототехники в медицине является робот Veebot. Данный робот разработан для эффективного забора крови. Его разработчик, Ричард Харрис из Принстонского университета, придумал его еще на третьем курсе. Для того чтобы взять кровь, Veebot сканирует руку пациента при помощи программного обеспечения для анализа изображений и выбирает вену, которая идеально подходит для взятия крови. Затем Veebot с помощью ультразвука и инфракрасного излучения исследует вену, прежде чем выровнять иглу и ввести ее. Сейчас Veebot определяет с 83-процентной точностью лучшую вену, но работа над улучшением показателя не прекращается, чтобы обеспечить уменьшение дискомфорта для пациента и рисков, связанных с ошибками при взятии образцов крови. К началу клинических исследований разработчики планируют достичь 90-процентной точности.

Робот ARTAS. Это инновационное медицинское оборудование, специализированное на процедуре трансплантации волос, которое разработала компания Restoration Robotics. ARTAS оборудован системой технического зрения, которая сканирует и картографирует область донорских волос на голове пациента. При разработке схемы пересадки волос учитывается количество волос, их плотность, расположение, направление роста, цвет и другие параметры. Для извлечения волос используются точные алгоритмы, которые минимизируют повреждения и обеспечивают высокую скорость работы. После извлечения фолликулы расставляются в соответствии с определенным шаблоном в области редеющих или облысевших участков кожи головы. Результат, получаемый после процедуры, способен обеспечить быстрое восстановление пациента и естественный и профессиональный внешний вид волос в зоне их пересадки.

Заключение. Инновации в области медицинской робототехники, включая роботоассистированные и автономные системы, привносят значительные изменения в хирургическую практику и процессы медицинского ухода. Необходимо отметить, что хотя эти роботы представляют собой значительный прогресс в области медицинской робототехники, они все еще требуют человеческого наблюдения и участия,

особенно в случае неожиданных ситуаций. Также стоит отметить, что на данный момент подобные роботы являются узкоспециализированными, т.е. они не способны выполнять больше одной задачи. Однако их развитие и усовершенствование могут значительно улучшить качество медицинской и хирургической помощи, обеспечивая пациентам более безопасные и эффективные процедуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роботизированный хирургический комплекс Da Vinci [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pirogov-center.ru/patient/innovative-technologies/da-vinci/> (дата обращения: 07.03.2024).

2. Robot performs first laparoscopic surgery without human help [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hub.jhu.edu/2022/01/26/star-robot-performs-intestinal-surgery/> (дата обращения: 08.03.2024).

3. Making a robot that can draw blood faster and more safely than a human can [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spectrum.ieee.org/profile-veebot> (дата обращения: 08.03.2024).

4. Artas Robot, our ally from the future [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://centre-racine2.com/en/the-center/artas-robot/> (дата обращения: 13.03.2024).

5. ARTAS Robotic System защитит от облысения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robotrends.ru/pub/1551/artas-robotic-system-zashitit-ot-oblyseniya> (дата обращения: 13.03.2024).

УДК 615.47

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ФРАКЦИИ ЗЕРНИСТЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Дашкевич, аспирант; А.А. Изюмов, ст. преп. каф. КСУП;

В.П. Коцубинский, к.т.н., доцент ОИТ ИШИТР НИ ТПУ

Научный руководитель А.Е. Карелин, доцент каф. КСУП, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, kvp@ksup.tusur.ru

Изучена проблема разработки системы на базе нейронных сетей для распознавания фракции зернистых сыпучих материалов и их размера с использованием IP-камеры.

Ключевые слова: машинное зрение, искусственный интеллект, нейронная сеть, щебень, распознавание объектов, YOLO.

На многих предприятиях в качестве помощника используется машинное зрение. Эта технология в области искусственного интеллекта нацелена на получение и анализ изображений путем использования специализированных камер и оборудования в промышленной среде. Полученные данные можно использовать для решения широко-

го спектра рабочих задач, технологии машинного зрения позволяют отказаться от менее эффективного человеческого труда [1]. Данная система была разработана для упрощения жизни большинства людей.

Система распознавания фракции щебня предназначена для выявления негабаритных кусков. Данная функция позволяет с легкостью и более высокой точностью выявить, к какому классу крупности подходит тот или иной кусок камня.

Система на основе машинного зрения будет оценивать качество погрузки щебня, его фракцию, сравнивая его с «паспортом погрузки», в котором указаны стандартные значения заполнения транспорта. Цифровой сервис предназначен для предоставления корректирующих рекомендаций специалистам.

Технология компьютерного зрения создает изображения в реальном времени, а алгоритмы машинного обучения используются для прогнозирования базового слоя. Их результаты, как эталонные замеры, с помощью которых можно корректировать веса или коэффициенты в нейросетях.

В качестве камеры для распознавания щебня была выбрана серия Basler dart (рис. 1) компании BASLER.

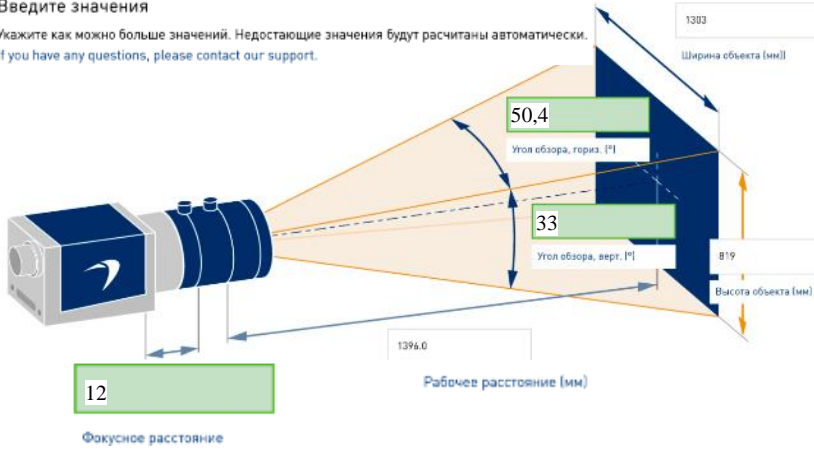


Рис. 1. Внешний вид камеры

Нейронная сеть способна обнаруживать камни и оценивать их размер в пикселях, однако ее основная задача – определить их физический размер (рис. 2). Для достижения этой цели необходим алгоритм для преобразования пикселей в миллиметры, что крайне важно для обеспечения точности прогнозов. Важно отметить, что точность алгоритма зависит от точности измерений, используемых для получения коэффициента преобразования, и калибровки камеры, используемой для получения изображений [2].

Введите значения

Укажите как можно больше значений. Недостающие значения будут рассчитаны автоматически.
If you have any questions, please contact our support.



В выделенных зеленым полях указаны рассчитанные значения
Рис. 2. Пример приведения пикселей в миллиметры

Среди различных алгоритмов обнаружения объектов система You Only Look Once (YOLO) выделяется своим замечательным балансом скорости и точности, позволяя быстро и надежно идентифицировать объекты на изображениях. Главное, что отличает YOLO от всех других архитектур, – блок под названием Dense Prediction. Dense Prediction является мощным компонентом архитектуры нейронных сетей, который обеспечивает пространственно плотное предсказание классов или меток для каждого пикселя или патча входного изображения. Это позволяет достичь более высокой точности, лучшей локализации и более детальной информации о содержании изображений в различных задачах компьютерного зрения [3].

Помимо тренировочных данных (train data), для объективной оценки качества построенной модели и получения предсказаний на «свежих» данных используются валидационные выборки – validation data (рис. 3).

Для решения поставленной задачи с использованием сервиса Google Colab был написан код на Python, который, используя библиотеку YOLO, позволяет распознавать щебень на разном расстоянии. Для проведения эксперимента были сделаны фотографии с помощью широкоугольной камеры с разрешением 3024×4032 в зуме ×0,5; ×1; ×2; ×3 и ×4. Эксперимент показал, что результат распознавания щебня не только удовлетворителен, но даже более, так как при увеличении ×4 нейросеть начала распознавать более мелкий щебень, которого в теории не должно быть, потому что щебень должен быть одной фракции.

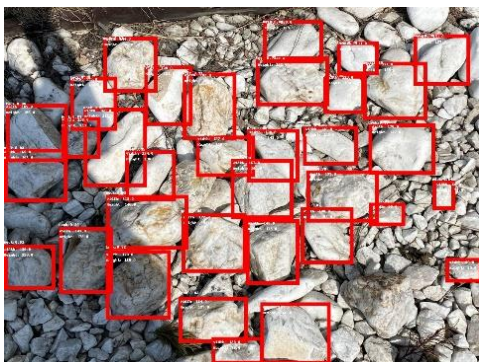


Рис. 3. Конечная обработка изображения нейросетью

Помимо распознавания, реализованная программа выводит размер фракции (рис. 4). Из фотографии можно понять, что высота 334 px, а его ширина 291px, а фактическая высота этого камушка 19 мм, что позволяет сделать вывод о хорошем качестве построенной системы.

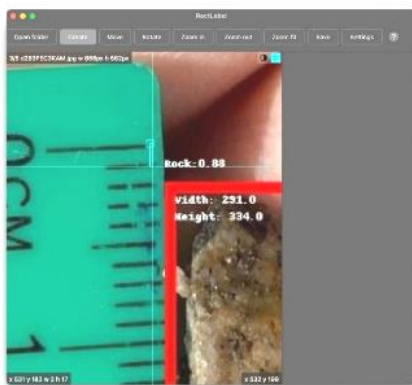


Рис. 4. Определение 1 мм в px

ЛИТЕРАТУРА

1. Что такое машинное зрение [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vitec.ru/znaniya/articles/prakticheskie-voprosi-primeneniya-teh-zrenia/> (дата обращения: 25.02.2024).

2. Набр. На вес золота: как получать данные о размере и составе руды за секунды, а не часы [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/companies/redmadrobot/articles/670132/> (дата обращения: 25.03.2024).

3. Набр. Как работает Object Tracking на YOLO и DeepSort [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/514450/> (дата обращения: 30.04.2023).

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КРАН

*А.М. Пасюков, Д.Д. Левченко, А.Х.А. Сундуй, К.В. Бесфамильный,
А.И. Ангаров, А.А. Зотов, студенты
г. Томск, НИ ТПУ, am16@tpu.ru*

Идея проекта заключается в создании роботизированного манипулятора на основе электронного конструктора Arduino.

Ключевые слова: манипулятор, серводвигатель, датчик, транзистор.

Роботизированные краны широко применяются в различных областях промышленности, начиная от автомобильных заводов и заканчивая атомными электростанциями. Именно поэтому данные причины обусловили актуальность создания и применения грузоподъемных кранов с программным управлением (рис. 1–3).

Задачи проекта:

1. Составить чертёж конструкции.
2. Составить электросхему.
3. Собрать роботизированный кран.

В результате ожидается получить роботизированный манипулятор.

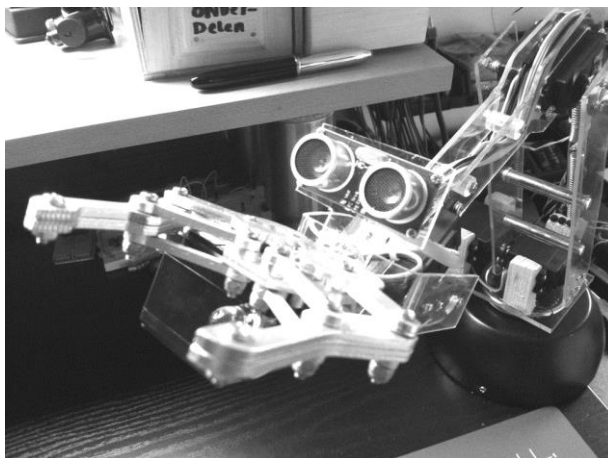


Рис. 1. Робот-манипулятор на Arduino

Функции:

- захват объекта;
- дистанционное управление;
- идентификация объектов;

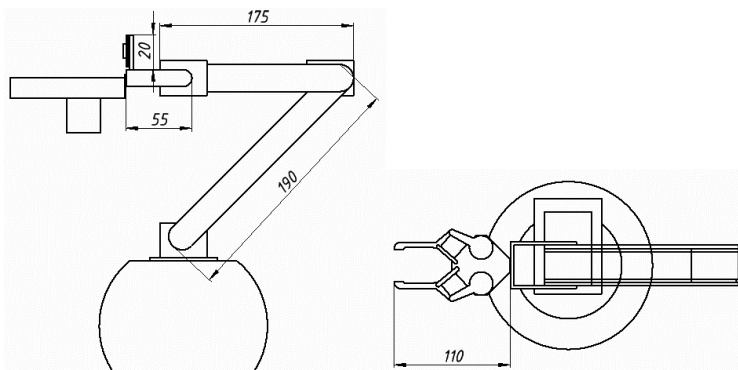


Рис. 2. Схема установки

Максимальный вес, который может поднять робот-манипулятор,
 $m \leq 1,08$ кг.

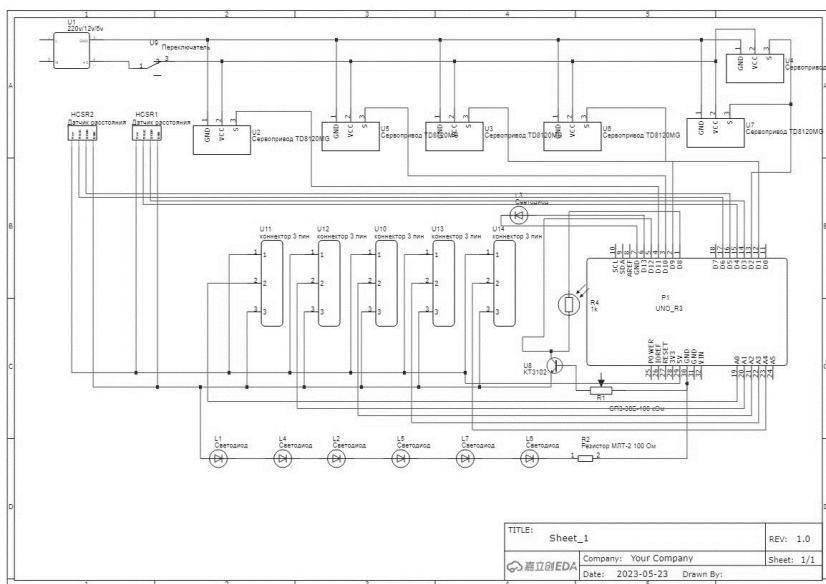


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема

Программа для управления «манипулятором» состоит из 4 модулей:

1. Основной код – программный код для управления манипулятором вручную с помощью потенциометров.

2. Функция прерывания – здесь написан код для расчета расстояния, условия наклона и захвата «манипулятора».

3. Функция захвата – здесь написан код для захвата клешней.
4. Функция наклона – здесь написан код для наклона «манипулятора».

Управление «манипулятором» происходит в основном коде с помощью потенциометров.

Значения сопротивления потенциометра переводятся в угол поворота для сервопривода и передается команда поворота в данный угол для сервопривода.

Когда меняется значение сопротивления потенциометра, меняется также угол поворота сервопривода.

Если во время выполнения основного кода происходит нажатие кнопки, работа кода переходит в функцию прерывания. В функции прерывания с помощью датчиков рассчитываются расстояния от датчиков до объекта. Если 2 расстояния равны друг другу, это означает, что «манипулятор» направлен в «стену», если же они не равны, то перед «манипулятором» находится объект, если расстояние до объекта в зоне досягаемости клешней, вызывается функция захвата, иначе выполняется функция наклона и «манипулятор» после наклона вызывает функцию захвата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Робот-манипулятор: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://arduino-diy.com/arduino-robot-manipulyator> (дата обращения: 03.03.2024).
2. Серводвигатель futaba-s3003 [Электронный ресурс]. – URL: <https://voltiq.ru/shop/futaba-s3003/> (дата обращения: 03.03.2024).
3. Alex Gyver. Робот манипулятор на ардуино [Электронный ресурс]. – URL: <https://alexgyver.ru/armtank/> (дата обращения: 03.03.2024).

УДК 004.896

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ С УЧЕТОМ ОБЛАСТИ ВИДИМОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АЭРОНАВИГАЦИОННОМ СЛЕЖЕНИИ

Д.К. Зацепин, студент

*Научный руководитель И.В. Ионова, доцент каф. математики, к.ф.-м.н.
г. Рязань, РГУ им. С.А. Есенина, zatsepin_01@mail.ru*

Представлена разработка метода оптимизации траектории, учитывающего видимость цели и безопасность летящего объекта. Данный метод ориентирован на максимизацию видимости цели или области интереса, учитывая при этом особенности управления как положением, так и углом поворота (γ_{aw}) робота.

Ключевые слова: трекинг, дрон, FOV, оптимизация, траектория, автономные системы.

В последние годы прогресс в различных аспектах автономных роботов позволяет решать сложные систематические задачи. При выполнении задач роботы обычно оснащаются датчиками для получения информации о внешней среде. Однако сенсоры, используемые на таких устройствах, часто имеют ограниченное поле зрения (FOV), что ставит перед исследователями задачу адаптации положения и ориентации робота для обеспечения оптимального обзора целей [1, 2].

Для начала осуществим постановку задачи. Цель оптимизатора состоит в том, чтобы создать траекторию, которая максимизирует видимость цели. Видимость определяется тремя частями: DO, AO и OE.

Рассмотрим задачу, исходя из следующих предположений:

1. Одновременно можно выбрать только одну цель.
2. Цель статична или имеет плавную и ограниченную скорость и ускорение.
3. Датчик, установленный непосредственно перед дроном, имеет коническое ограниченное поле зрения.

Обозначим позицию дрона $d = [x_d, y_d, z_d] \in \mathbb{R}^3$, Эйлеров угол рыскания дрона $\varphi_d \in SO(2)$, положение цели $c = [x_c, y_c, z_c] \in \mathbb{R}^3$. Метрика видимости состоит из трех частей, а именно:

1. Ожидается, что цель будет наблюдаться на соответствующем расстоянии от дрона.

$$l_{\min} < \|d - c\| < l_{\max},$$

где l_{\min}, l_{\max} – нижняя и верхняя границы оптимального наблюдения.

2. Для того, чтобы поле зрения датчика была направлена прямо к цели, ожидается, что угол отклонения от пути будет равен φ_0 , который определяется следующим образом:

$$\varphi_0 = a \tan 2 \left(e_y^T (d - c), e_x^T (d - c) \right),$$

где $e_y = [0, 1, 0]^T$, $e_x = [1, 0, 0]^T$.

3. Как показывает двухмерный профиль на рис. 1, диапазон без пунктира является полем зрения дрона. Область, ограниченная пунктирной линией, представляет уверенное поле зрения, внутри которого, как ожидается, будет находиться цель без каких-либо препятствий. Однако математически такое требование не может быть записано, поэтому вводится аппроксимация уверенного поля зрения. Она представлена в виде последовательности сфер $\{S_1, S_2, \dots, S_M\}$. Сфера S_i на рис. 1 представлена в виде окружности с центром в точке c_i и радиусом r_i , которые определяются по формулам:

$$c_i = d + \alpha_i(c - d), \quad r_i = \beta \alpha_i \|d - c\|,$$

где $\alpha_i = \frac{i}{M} \in [0, 1]$, а β определяется исходя из желаемого размера уверенного поля зрения. Тогда для каждой такой сферы можно гарантировать, что $r_i < \theta(c_i)$, где $\theta(c_i): \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ – расстояние от центра сферы до ближайшего препятствия.

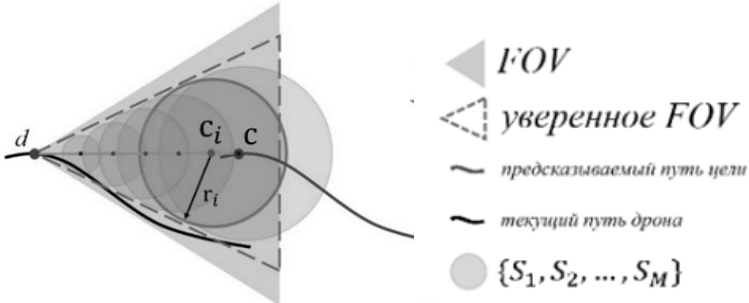


Рис. 1. Дрон в позиции d наблюдает за целью c

Необходим совместный оптимизатор траектории, который может генерировать динамично реализуемую траекторию без столкновений с учетом плавности и видимости цели.

Траектория параметризуется четырехмерной нефиксированной однородной B -сплайн кривой, которая представляет собой кусочный полином, однозначный, определяемый его степенью n , размахом узла Δt и N контрольными точками $\{Q_i, \Phi_i\} \in \mathbb{R}^3 \times SO(2)$. Планирование контрольных точек положений Q_i и углов отклонений от курса Φ_i в уменьшенном пространстве четырех выбранных дифференциально плоских выходов $\{x, y, z, \varphi\}$ сделано аналогично, что и в работе [3].

Путем практических наблюдений выбрана степень $n = 3$, тогда общая продолжительность траектории равна $(N - 3) * \Delta t$. Учитывая, что целевые функции представлены выражениями каждой путевой точки $\{d_k, \Phi_{d,k}\}$ и дистанцией h_k до цели c_k , они должны быть рассчитаны заранее:

$$d_k = \frac{1}{6}(Q_k + 4Q_{k+1} + Q_{k+2}), \quad h_k = \|d_k - c_k\|, \quad k \in \{1, 2, \dots, N-2\},$$

где $\Phi_{d,k}$ определяется на основе значений контрольных точек $\Phi_k, \Phi_{k+1}, \Phi_{k+2}$ с использованием аналогичной формулы, которая применяется для расчета позиции d_k .

И окончательная задача оптимизации определяется выражением

$$\min_{Q, \Phi} T = [T_{D0}, T_{A0}, T_{0E}, T_0, T_{0\Phi}, T_E, T_{E\Phi}, T_C] * \omega,$$

где ω – вектор весов для расчета каждой стоимости;

$T_{D0} = \sum_{k=1}^{N-2} g(h_{\min}^2 - h_k^2) + g(h_k^2 - h_{\max}^2)$ – стоимость, связанная с расстоянием наблюдения за целью;

$T_{A0} = \sum_{k=1}^{N-2} (\varphi_{d,k}^2 - \varphi_{0,k}^2)$ – стоимость, связанная с углом наблюдения;

$T_{0E} = \sum_{k=1}^{N-2} \sum_{i=1}^M g(r_{k,i}^2 - \theta^2(c_{k,i}))$ – стоимость, связанная с эффектом заслонения от препятствий;

$T_0 = \sum_{i=1}^{N-1} g(\|V_i\|^2 - v_m^2) + \sum_{i=1}^{N-1} g(\|A_i\|^2 - a_m^2)$ – стоимость, связанная с динамическими ограничениями траектории скоростью

$V_i = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta t}$ и ускорением

$A_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{\Delta t}$; $T_{0\Phi} = \sum_{i=1}^{N-1} g(\|V_{\Phi,i}\|^2 - v_{\Phi,m}^2) + \sum_{i=1}^{N-1} g(\|A_{\Phi,i}\|^2 - a_{\Phi,m}^2)$ – стоимость, связанная с динамическими ограничениями скорости и ускорения угла поворота;

$T_E = \sum_{i=1}^{N-3} \|J_i\|^2$ – стоимость, связанная с

гладкостью движения, вычисляемая на основе рывка $J_i = \frac{A_{i+1} - A_i}{\Delta t}$ на

i -й контрольной точке; стоимость, связанная с гладкостью поворота $T_{E\Phi}$, вычисляется аналогично T_E на основе $J_{i\Phi}$;

$T_C = \sum_{i=1}^N g(h_0^2 - \theta^2(Q_i))\theta(Q_i)$ – стоимость, связанная с избеганием

столкновений; h_0 – пороговое расстояние безопасности; $g(x) = \max\{0, x\}^3$ – функция штрафа. Предложенный метод и метод фаст-трекинга были сравнены путем моделирования при параметрах $h_{\min} = 2,5$ м, $h_{\max} = 3,5$ м, $\beta = 0,8$, $M = 10$. Результаты сравнения приведены в таблице (v_{\max} – максимальная скорость преследования, t_{ft} – время видимости цели при методе fast-tracking, t_m – время видимости цели при предложенном методе, общее время эксперимента – 100 с), а моменты компьютерной симуляции показаны на рис. 2.

Результаты компьютерной симуляции

v_{\max} (м/с)	0,5	1,5	2,5
t_{ft} (с)	39,1	66,25	11,0
t_m (с)	100	100	85,7

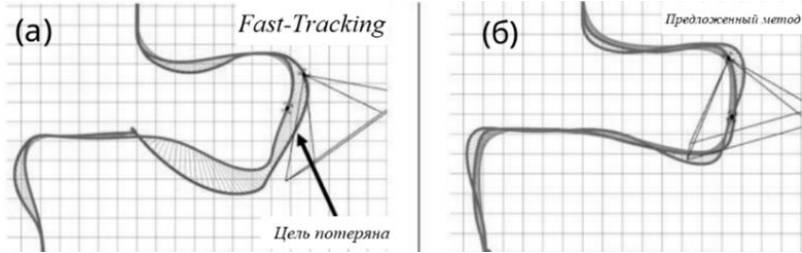


Рис. 2. Результаты моделирования:
а – Fast-Tracking; б – предложенного метода

Представленный метод оптимизации траектории для дронов успешно объединяет параметры расстояния, угла наблюдения и эффекта заслонения, обеспечивая улучшенное поле зрения и устойчивость к потере цели в сравнении с традиционными методами. Эффективность подхода дополнительно подтверждена через моделирование, подчеркивая его преимущества в сравнении со стандартными системами слежения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Real-time motion planning for aerial videography with real-time with dynamic obstacle avoidance and viewpoint optimization / T. Nageli, J. Alonso-Mora, A. Domahidi, D. Rus, O. Hilliges // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2017. – Vol. 2, No. 3. – P. 1696–1703/
2. Autonomous drone cinematographer: Using artistic principles to create smooth, safe, occlusion-free trajectories for aerial filming / R. Bonatti, Y. Zhang, S. Choudhury, W. Wang, S. Scherer // International Symposium on Experimental Robotics. – Springer, 2018. – P. 119–129.
3. Path planning for autonomous vehicles in unknown semi-structured environments / D. Dolgov, S. Thrun, M. Montemerlo, J. Diebel // International Journal of Robotics Research. – 2010. – Vol. 29, No. 5. – P. 485–501.
4. Морозова Е.Н. Mechatronics and Robotics: учеб. пособие. – Йошкар-Ола: Изд-во ПГТУ, 2023. – 98 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.7

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Председатель – Шурыгин Ю.А., директор департамента
управления и стратегического развития ТУСУРА,
зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.;*

зам. председателя – Черкашин М.В., доцент каф. КСУП, к.т.н.

УДК 621.375.132

РАЗРАБОТКА БУФЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ S-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

Д.В. Борисов, инженер ЛПРИСиСНК;

А.А. Коколов, зав. лаб. ЛПРИСиСНК

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

Представлены результаты разработки и моделирования буферного усилителя S-диапазона на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии. Рабочий частотный диапазон устройства составил 2–4 ГГц. Усиление в рабочей полосе составляет 21 ± 1 дБ, отражение от портов на уровне –10 дБ, выходная мощность в точке сжатия 1 дБ – 11,9 дБм, КПД составляет 16,2%. Потребляемая мощность схемы – 101,1 мВт, площадь кристалла – 1,7 мм².

Ключевые слова: КМОП, S-диапазон, буферный усилитель, 180 нм, каскад.

СВЧ-усилители предназначены для усиления радиочастотного сигнала в частотном диапазоне от десятков мегагерц до нескольких гигагерц. Буферный усилитель (БУ) S-диапазона может применяться в устройствах, работающих по протоколам Bluetooth, WLAN IEEE802.11b/g, а также в различных радиолокационных системах [1].

В данной статье приведены результаты разработки и моделирования БУ с использованием 180 нм комплементарной МОП технологии отечественного производителя АО «Микрон».

Для КМОП-усилителей СВЧ-диапазона наиболее распространены две схемы: каскадная и каскодная [2]. Сравнив схемы усилителей, их достоинства и недостатки, можно сказать, что наиболее оптимальной

является каскадная схема. На ее основе была разработана схема буферного усилителя, представленная на рис. 1.

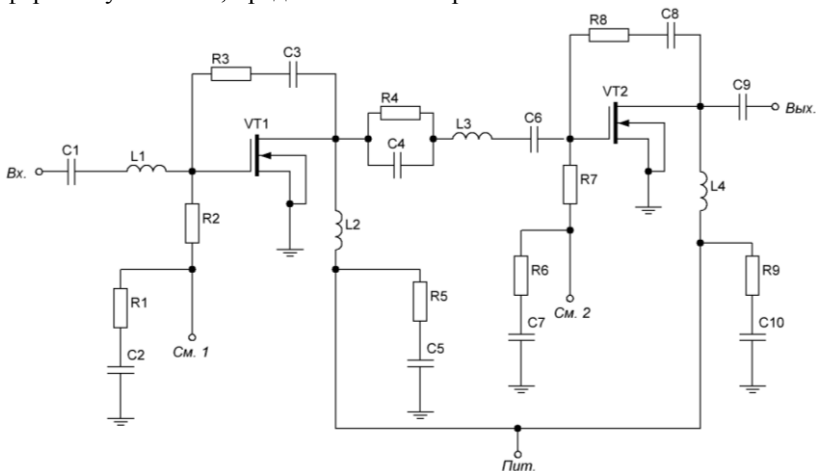


Рис. 1. Принципиальная схема БУ S-диапазона на основе 180 нм КМОП

Оба каскада усилителя включают в себя последовательные RC -цепи. Данные цепи являются обратной связью и обеспечивают устойчивость схемы. Также между каскадами включена корректирующая RC -цепь. Она состоит из элементов R_4 и C_4 , и необходима для выравнивания АЧХ-усилителя. Индуктивности L_1 , L_2 и L_3 , включенные на входе усилителя и между его каскадами, необходимы для снижения влияния емкостной составляющей входного сопротивления транзисторов. Номинал данных катушек составил 2; 3,8 и 5 нГн. Был проведен ЭМ-анализ данных индуктивностей в диапазоне частот 0,1–10 ГГц.

При помощи САПР Cadence была разработана и промоделирована топология СВЧ ИС (рис. 2).

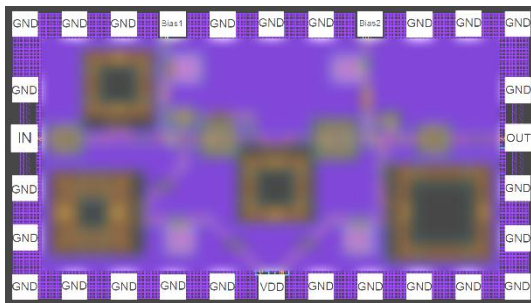


Рис. 2. Топология СВЧ ИС БУ S-диапазона ($1,7 \times 1$ мм²)

На рис. 3 представлены частотные зависимости S-параметров, коэффициента шума и устойчивости устройства, смоделированные при разных температурах (-60 , $+25$ и $+125$ °C).

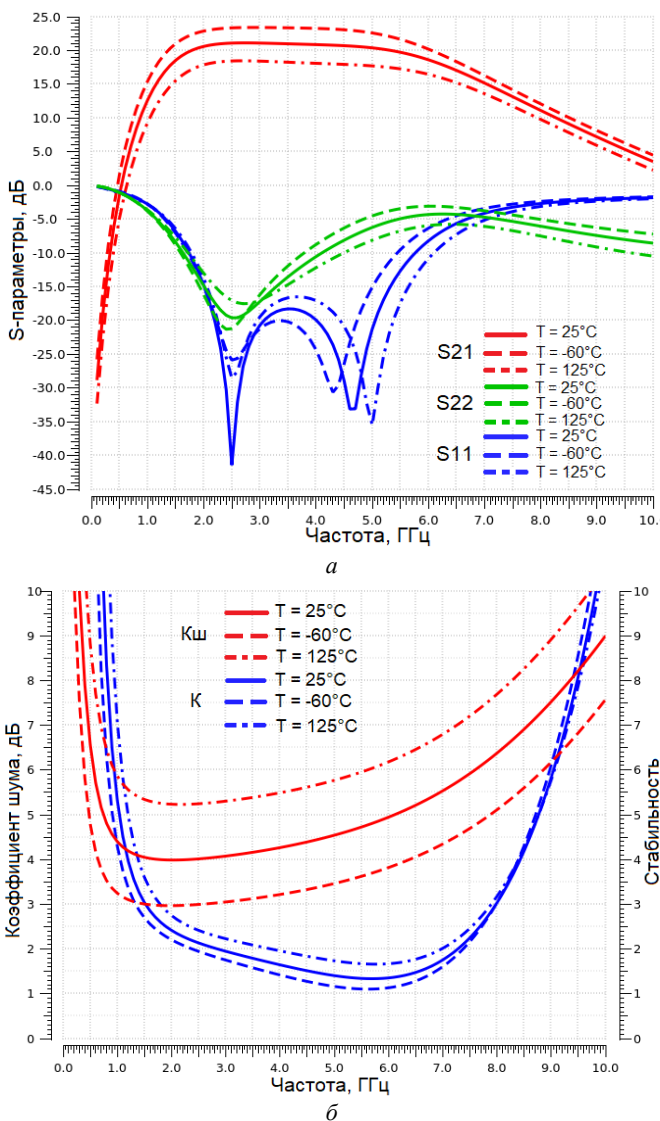


Рис. 3. S-параметры (а), коэффициент шума и устойчивости (б) СВЧ ИС БУ S-диапазона при $T = -60$, $+25$ и $+125$ °C

По данным зависимостям видно, что при минимальном значении температуры коэффициент усиления составляет 23,3 дБ, при максимальном – 18,5 дБ. Разброс коэффициента усиления составляет 4,8 дБ. Коэффициент усиления при нормальных условиях – 21 ± 1 дБ. Также видно, что согласование ухудшилось, так как S11 и S22 увеличились. Показатель стабильности усилителя превышает 1 на всём частотном диапазоне вне зависимости от температуры. Это говорит о корректной работе усилителя. Коэффициент шума при нормальных условиях изменяется от 3,9 до 4,4 дБ.

На рис. 4 представлены результаты моделирования разброса технологического процесса для лучшего и худшего случая.

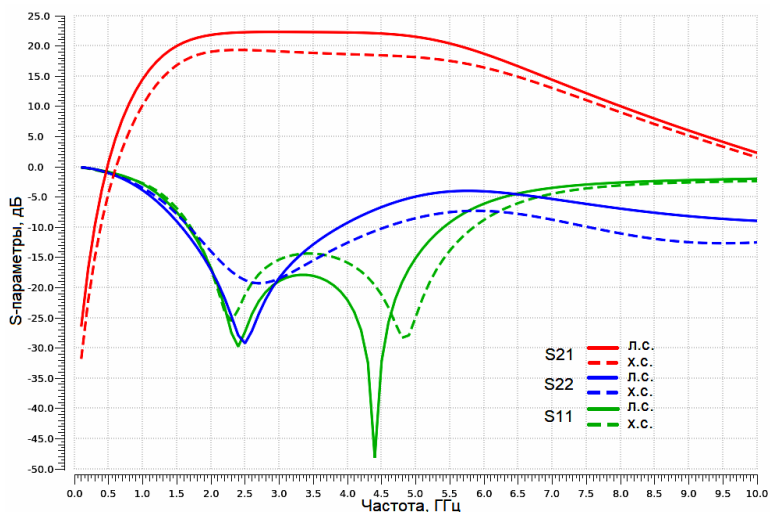


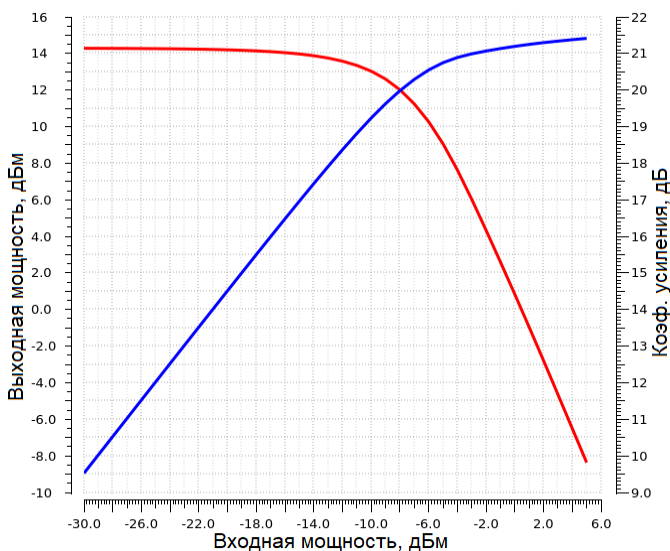
Рис. 4. S-параметры в зависимости от разброса параметров технологического процесса

По полученным характеристикам видно, что в лучшем случае коэффициент усиления составляет 22,3 дБ, в худшем случае – 19,1 дБ. В обоих случаях коэффициенты отражения от портов находятся на уровне –10 дБ.

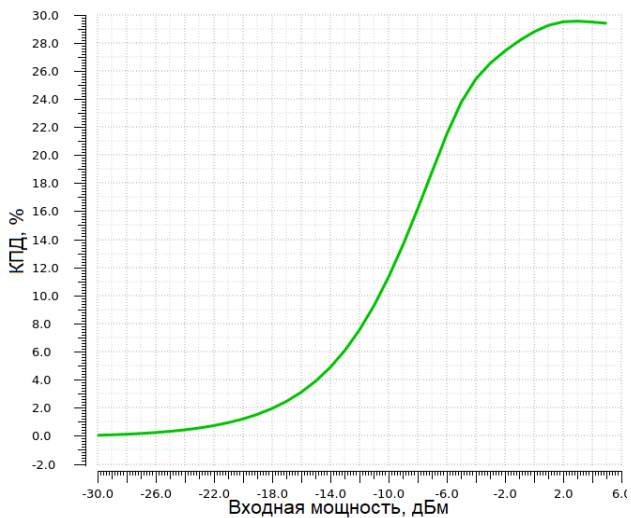
По зависимостям, представленным на рис. 5, видно, что в точке сжатия на 1 дБ выходная мощность составляет 11,9 дБм. При этом входная мощность – 8 дБм. Максимальный КПД разработанного БУ составляет 29,6%. Данное значение достигается при уровне входной мощности в 3 дБм. В точке сжатия на 1 дБ КПД составляет 16,2%.

Рабочий частотный диапазон разработанного устройства составляет 2–4 ГГц. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ – 11,9 дБм.

Коэффициент усиления составляет 21 ± 1 дБ, коэффициенты отражения от портов на уровне -10 дБ. Потребляемая мощность – $101,1$ мВт. КПД БУ в точке сжатия на 1 дБ составил $16,2\%$.



a



б

Рис. 5. Зависимости выходной мощности, коэффициента усиления (*a*) и КПД БУ (*б*) от входной мощности на частоте 3 ГГц

Разработка микросхемы выполнялась в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор FEWM-2022-0006). Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW».

ЛИТЕРАТУРА

1. Dao V.K. Dual-band LNA for 2.4/5.2 GHz applications / V.K. Dao, B.G. Choi, C.S. Park // Asia-Pacific Microwave Conference. – 2006.
2. Садо́мовский А.С. Приёмопередающие радиоустройства и системы связи. – Ульяновск: УЛГТУ, 2007. – 243 с.

УДК 621.382

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

К.Е. Шушарина, инженер ЛПРИСиСНК;

Ф.И. Шеерман, в.н.с. НИИ МЭС;

А.А. Коколов, зав. ЛПРИСИСНК

г. Томск, ТУСУР, kristina.e.shusharina@tusur.ru

Описаны результаты разработки и моделирования интегрального датчика температуры на основе российской 180 нм комплементарной МОП-технологии. Датчик температуры выполнен на основе паразитных вертикальных биполярных PNP-транзисторов. Диапазон рабочих температур датчика от -60 до $+125$ °С. Входная мощность устройства составила 2234 мкВт, напряжение питания 3,3 В. Выходное опорное напряжение при нормальных условиях ($T = 27$ °С) составляет 1,17 В; амплитуда изменения выходного опорного напряжения в диапазоне рабочих температур составляет менее 7,49 мВ. Размеры кристалла $0,5 \times 0,5$ мм².

Ключевые слова: КМОП, температурный датчик, 180 нм.

Интегральный датчик температуры представляется в виде микросхемы, содержащей в себе чувствительный элемент для измерения температуры от -55 до 150 °С. Обладает такими достоинствами, как дешевизна, высокая точность измерения и линейность характеристик.

Использование кремниевых диодных структур в датчиках температуры позволяет получить более линейную температурную характеристику по сравнению с использованием резисторов [1]. Однако схе-

мы, использующие один $p-n$ -переход, имеют низкую точность и большой разброс параметров. В настоящее время вместо диодов в КМОП-технологии используют паразитный вертикальный PNP-транзистор [2].

В данной работе рассматривается разработка интегрального датчика температуры, чувствительным элементом которого выступают вертикальные паразитные биполярные транзисторы на основе 180 нм комплементарной МОП-технологии АО «Микрон». Принципиальная схема устройства и топология представлены на рис. 1 и 4 соответственно.

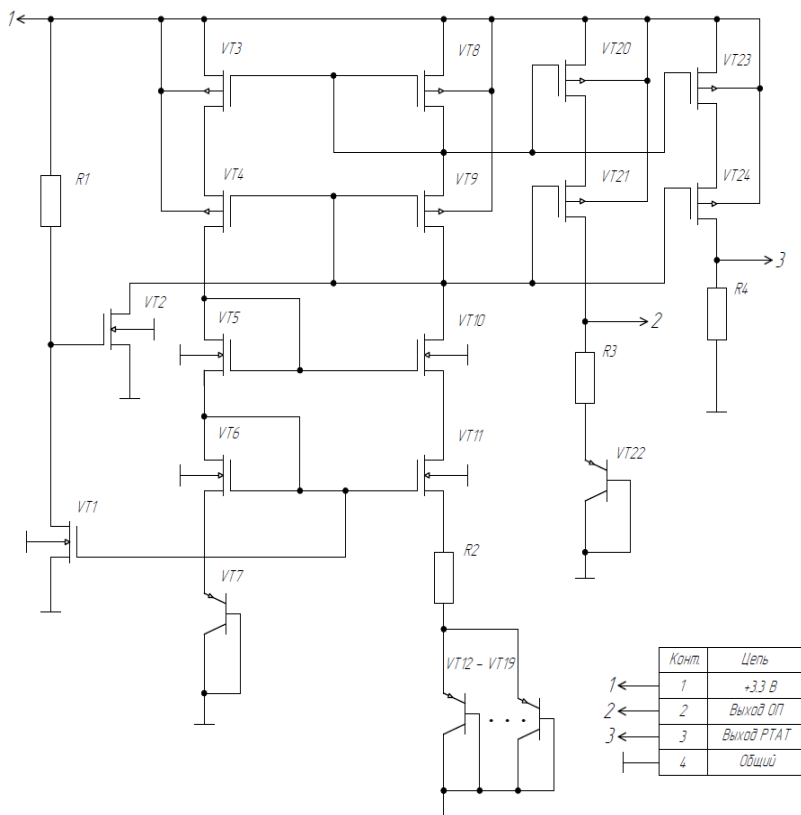


Рис. 1. Принципиальная схема датчика температуры

Запускающая цепь (цепь автозапуска) реализована на резисторе R_1 и транзисторах VT_1 и VT_2 . Данная цепь необходима для предотвра-

щения нежелательного состояния, когда на затворах транзисторов нижнего плеча токового зеркала VT₅, VT₆, VT₁₀, VT₁₁ возникает низкий потенциал (земля), а на затворах транзисторов верхнего плеча VT₃, VT₄, VT₈, VT₉ – напряжение питания. Для формирования равных напряжений в ветвях схемы используются токовые зеркала. Транзисторы VT₃–VT₆ и VT₈–VT₁₁ представляют собой каскодный бета-умножитель. Чтобы сделать токи равными в каждой ветви бета-умножителя, мы используем каскод на *p*-МОП-транзисторах, чтобы уменьшить зависимость опорного тока от напряжения питания, используем каскод на *n*-МОП-транзисторах [3].

На выходах 2 и 3 формируются опорное напряжение (ОП) и пропорциональное абсолютной температуре напряжение (PTAT) соответственно. Напряжение PTAT генерируется из разницы напряжений база-эмиттер между двумя транзисторами, смещенными при разных плотностях тока. Тогда разница напряжений база-эмиттер транзисторов определяется формулой [2]

$$\Delta U_{БЭ} = \frac{\kappa \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_H}\right) - \frac{\kappa \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{r \cdot I_H}\right) = \frac{\kappa \cdot T}{q} \cdot \ln(r), \quad (1)$$

где I – ток смещения, I_H – ток насыщения меньшего по площади транзистора, r – отношение площади эмиттера, κ – постоянная Больцмана, q – заряд электрона, T – температура по шкале Кельвина.

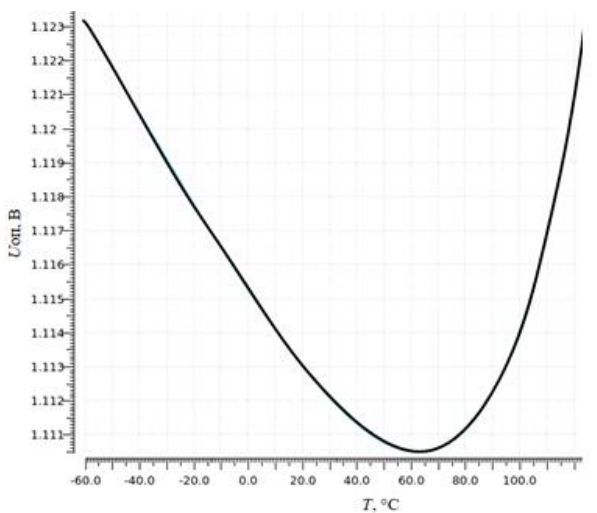
По формуле (1) можно сказать, что разница напряжений база-эмиттер транзисторов зависит только от r , а также независима от абсолютного тока смещения и тока насыщения. Стандартное значение отношения площади эмиттера от 8 до 12 соответствует напряжению при стандартных условиях ($T = 27$ °C) 60 мВ и коэффициенту нарастания $\approx 0,2$ мВ/К. Как следствие, при усилении $\Delta U_{БЭ}$ на коэффициент α и дальнейшем сложении его с $U_{СТАТ}$ получим необходимое опорное напряжение около 1,2 В. В таком случае опорное напряжение $U_{ОП}$ находится по следующей формуле (2):

$$U_{ОП} = \alpha \cdot \Delta U_{БЭ} + U_{БЭ} = U_{PTAT} + U_{СТАТ}. \quad (2)$$

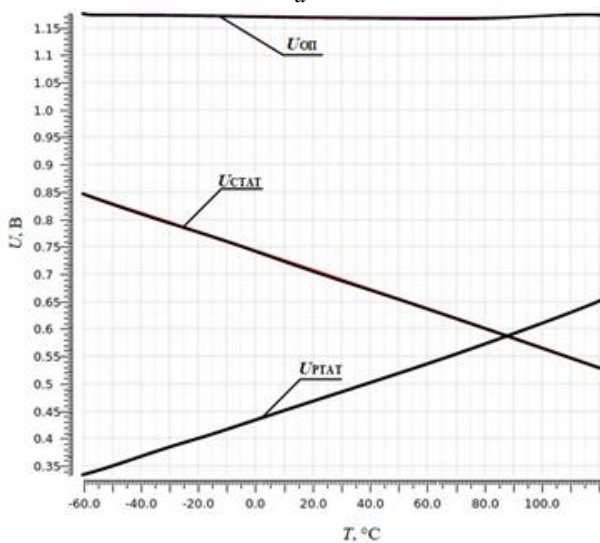
Зависимость напряжений $U_{СТАТ}$, U_{PTAT} , $U_{ОП}$ от температуры показана на рис. 2, б.

Технические характеристики устройства: напряжение питания +3,3 В; ток потребления 677 мкА; диапазон рабочих температур от –60 до +125 °C. Амплитуда изменения выходного опорного напряжения $U_{ОП}$ в диапазоне рабочих температур составляет 7,49 мВ (рис. 2, а), а величина напряжения при нормальных условиях ($T = 27$ °C) составляет 1,17 В.

Коэффициент температурной нестабильности согласно рис. 2, *a* составил 0,63%. Из рис. 3 видно, что коэффициент нестабильности по напряжению составляет 1,61%.



a



б

Рис. 2. Графики зависимости напряжений в схеме от температуры: *a* – зависимость опорного напряжения $U_{оп}$ от температуры; *б* – зависимости напряжений $U_{СТАТ}$ и $U_{РТАТ}$, составляющих $U_{оп}$, от температуры

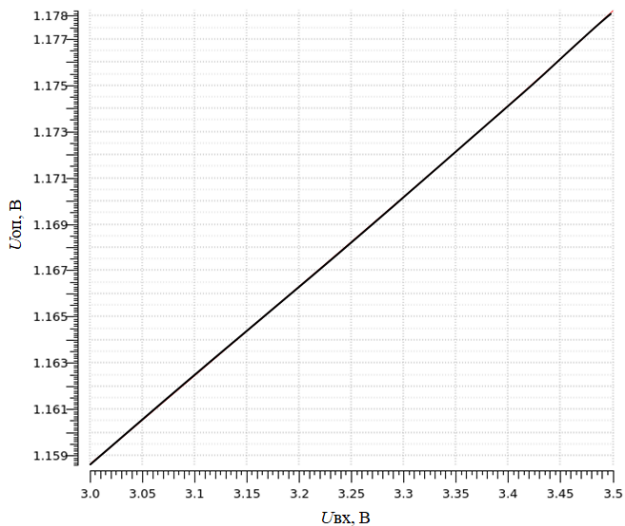


Рис. 3. График, отображающий зависимость опорного напряжения от напряжения источника питания

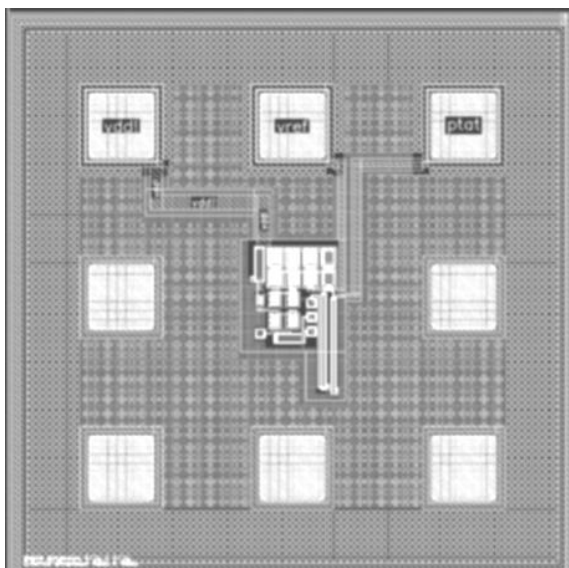


Рис. 4. Топология интегрального датчика температуры

Таким образом, на отечественной 180 нм КМОП АО «Микрон» был разработан и реализован интегральный датчик температуры, чув-

ствительным элементом которого выступают вертикальные паразитные биполярные транзисторы. Ток потребления схемы при питании 3,3 В составил 677 мкА; диапазон рабочих температур от –60 до +125 °С. Потребляемая мощность – 2234 мкВт. По проведенному моделированию схемы было установлено, что коэффициент температурной нестабильности составляет 0,63%, а коэффициент нестабильности по напряжению – 1,61%.

Разработка ИС была выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект «Молодежные лаборатории», уникальный идентификатор FEWM-2022-0006). Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW».

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В.С. Использование входного сопротивления транзистора для измерения температуры коллекторного перехода / В.С. Громов, И.Ф. Николаевский // Полупроводниковые приборы и их применение / под ред. Я.А. Федотова. – М.: Сов. радио, 1969. – С. 251–259.
2. Pertijs M.A.P. Precision temperature sensors in CMOS technology / M.A.P. Pertijs, J.H. Huijsing. – Dordrecht: Springer, 2006. – 301 p.
3. Русанов А.В. Источник опорного напряжения на ширине запрещенной зоны для отечественного технологического процесса / А.В. Русанов, Л.В. Сопина // Радиотехника и связь. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 84–89.

Секция 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

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

УДК 615.471

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФПГ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.А. Кобызева, студентка

Научный руководитель Т.Ф. Щербакова, доцент каф. РТС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР

Рассмотрено использование фотоплетизмограммы (ФПГ) в качестве источника информации о вариабельности сердечного ритма. Сделаны выводы о пригодности использования метода в системе мониторинга состояния водителей транспортных средств.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, фотоплетизмограмма, кардиоинтервалограмма, утомление, водитель ТС.

Обеспечение безопасности дорожного движения является актуальной задачей в современном мире. Одной из причин возникновения ДТП является нахождение водителя в состоянии дремоты или сильного утомления. Своевременное определение этих состояний и сигнализация о них может существенно снизить вероятность возникновения ДТП.

В проведенных ранее работах [1, 2] была спроектирована система предотвращения дремоты водителя, основанная на анализе электрокардиосигнала. Для увеличения комфорта водителя и увеличения надежности системы принято решение рассмотреть альтернативный вариант получения данных о вариабельности сердечного ритма с использованием фотоплетизмографии (ФПГ).

Преимуществом ФПГ является сравнительная простота датчика, который включает в себя два базовых элемента: источник излучения и фотоприемник. Источник излучения обычно представляет собой светодиод, излучающий свет определенной длины волны, фотоприемник может являться фотодиодом или фототранзистором. Степень поглощения света зависит от наполнения сосудов кровью [3]. Таким образом, на выходе датчика получается пульсовая волна.

Устройство регистрации ФПГ может быть крайне компактным и фиксироваться на теле без какого-либо дискомфорта. Датчик может быть размещен в различных местах, наиболее распространенными являются палец, ухо и запястье. Для обеспечения минимального дискомфорта и отвлекающих факторов для водителя выбрано расположение датчика на предплечье.

С целью оценки пригодности метода для решения поставленной задачи был собран прибор для регистрации ФПГ на базе датчика HW-827 и микроконтроллера ESP32. Поскольку устройство должно быть беспроводным, запись ФПГ производилась на компьютер после передачи данных с микроконтроллера с использованием технологии BLE. Таким образом, полученные записи максимально близки к записям, которые могут быть получены в реальных условиях (с учётом помеховой обстановки).

На рис. 1 приведены этапы обработки ФПГ. На верхнем графике показан необработанный сигнал с микроконтроллера. После тестирования различных фильтров оптимальным для поставленной задачи был выбран фильтр Баттлворта 3-го порядка с полосой пропускания 0–11 Гц. На среднем графике приведен результат фильтрации и нахождения пиков. Для исключения ложно определенных максимумов наложено дополнительное условие: между соседними пиками должно быть не менее 0,3 с. По полученным пикам строится эквивалент кардиоинтервалограммы (КИГ), показан на нижнем графике.

По результатам проведенных испытаний можно сказать, что предложенная обработка позволяет получить хорошо читаемые данные КИГ при использовании датчика ФПГ и беспроводной передачи. Предложенный метод можно рассматривать в качестве альтернатив-

ного варианта получения данных о вариабельности сердечного ритма с целью оценки утомляемости водителей транспортных средств.

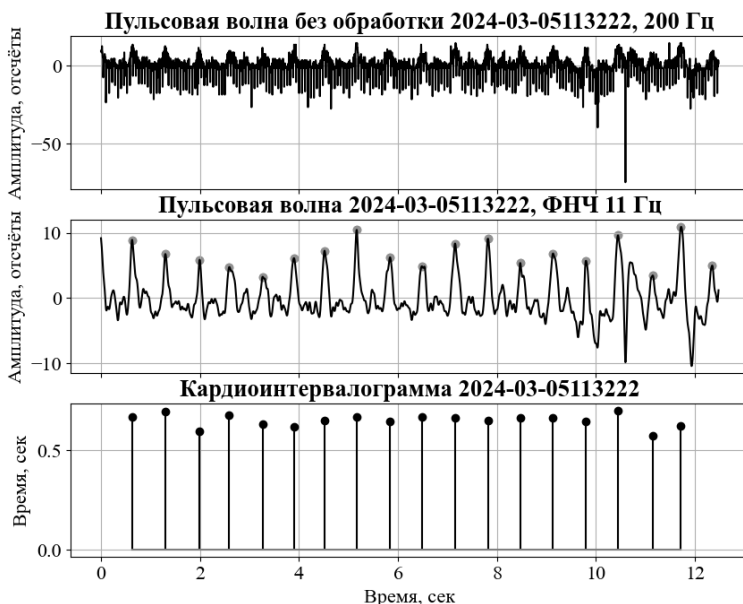


Рис. 1. Результаты испытаний

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение состояния водителя транспортного средства на основе анализа электрокардиосигнала / Т.Ф. Щербакова, С.С. Седов, Р.Р. Марданов, А.А. Кобызева, А.И. Валиева // Вестник Казан. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева. – 2022. – Т. 78, № 3. – С. 129–133.
2. Vehicle Driver Condition Monitoring System Based on Electrocardiographic Signal Analysis / A.F. Nadeev, T.F. Shcherbakova, A.A. Kobzyeva, S.S. Sedov // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, 2023. – P. 1–4. DOI: 10.1109/TIRVED58506.2023.10332663.
3. Алихашкина В.А. Определение вариабельности сердечного ритма на основе метода фотоплетизмографии / В.А. Алихашкина, М.С. Ашапкина, М.Б. Каплан // Матер. XXXVI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (Биомедсистемы – 2023) / Рязанский гос. радиотехн. ун-т им. В.Ф. Уткина, 6–8 декабря 2023 г. – Рязань: РГРТУ, 2023. – С. 177–180.

РАЗРАБОТКА ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ- ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИД

С.С. Сафонов, А.В. Кинах, студенты

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

г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) несут информацию о наличии и качестве квантовых ям светодиодных гетероструктур на основе InGaN/GaN. В работе приведено описание экспериментальной установки для измерения ВФХ на основе Agilent E4980A. В качестве среды создания ПО для автоматизированного измерения ВФХ была выбрана LabVIEW. Представлена и описана блок-диаграмма ПО. Разработанное ПО было опробовано при измерениях ВФХ СИД в диапазоне напряжений от +2 до -5 В, с шагом изменения 0,05 В.

Ключевые слова: автоматизированные измерения, вольт-фарадные характеристики, гетероструктура, емкость ЭДП.

Тенденции развития современной электроники требуют непрерывного совершенствования приборов и поисков методов наиболее точного измерения электрических параметров полупроводниковых устройств, в частности, светоизлучающих диодов (СИД). Одним из таких является метод ВФХ. Именно эти измерения дают возможность определения базовых параметров слоев СИД, которые затруднительно измерить прямыми методами. Кроме того, емкости $p-n$ -переходов различных гетероструктур дают полезную информацию о внутреннем дизайне, степени легирования и дефектности слоев.

Качество СИД можно определить по ВФХ – чем лучше отклик ямы, тем выше ее качество. Далее, зная напряжения, при которых возникает отклик, можно определить ширину области объемного заряда [1]. Однако методы ручного измерения ВФХ являются довольно трудоемкой задачей. Поэтому возникает необходимость разработки ПО для автоматизированного измерения ВФХ СИД.

Экспериментальная установка состоит из прецизионного измерителя LCR Agilent E4980A, ПК с ПО для автоматизированного измерения ВФХ и СИД на основе InGaN/GaN.

Прецизионный измеритель обеспечивает высокую точность и имеет широкий спектр измерений параметров. Измеритель E4980A имеет диапазон частот от 20 Гц до 2 МГц и встроенный источник напряжения смещения 40 В постоянного тока. Недостатком этого оборудования является отсутствие ПО для автоматизированного измерения характеристик полупроводниковых устройств [2].

В качестве образцов исследования были выбраны синие InGaN/GaN СИД фирмы Sanan мощностью 0,5 Вт, потребляемым током 150 мА и световым потоком 50–60 лм.

Описание программы. В качестве среды создания ПО для автоматизированного измерения ВФХ была выбрана LabVIEW, в которой используется язык графического программирования, выпущенный фирмой National Instruments.

На рис. 1 представлена блок-диаграмма ПО. Элемент управления 1 устанавливает диапазон измерений и тип импеданса. Программа Display VI 2 устанавливает страницу отображения и вводит символы в строке комментария. Элемент управления «Bias» 3 устанавливает смещение по постоянному току и функцию контроля смещения по постоянному току во включенное или выключенное состояние. Функция настройки триггера 4 переводит систему запуска в режим непрерывного включения или выключения и устанавливает источник запуска. В режиме непрерывного включения после считывания данных измерений контроллером состояние холостого хода автоматически устанавливается в состояние ожидания запуска.

Функция уровня и частоты сигнала 5 устанавливает уровень выходного напряжения/тока генератора, частоту и включает/выключает автоматический регулятор уровня. Функция диаграммы 6 устанавливает время интегрирования аналого-цифрового преобразователя и скорость усреднения. Функция уровня смещения 7 устанавливает напряжение/ток смещения постоянного тока. Триггер аннулирует все результаты измерений, имеющиеся в данный момент в устройстве, и запускает новый цикл измерения с текущими настройками, т.е. в нашем случае – с новыми значениями напряжения. Функция выборки 9 – это команда, которая извлекает данные измерений, полученные при выполнении измерений, инициируемых триггером, и помещает данные в выходной буфер. Цикл While 1) повторяет одну и ту же последовательность действий, пока повторяемое условие истинно. Также в блок-диаграмму добавлены возможность записи файла с массивом измерений и текстовый файл 11.

На лицевой панели разработанного ПО устанавливаются следующие параметры. Режим измерения по времени (short, medium, long), который влияет на точность измерений. Коэффициент усреднения (averaging factor) – функция усреднения прибора позволяет получать скользящее среднее значение последовательных результатов измерений. Уровень напряжения, начальное и конечное напряжение, а также шаг изменения напряжения и частота выбираются в зависимости от целей измерения. Кроме того, на лицевой панели ПО реализована возможность контроля получаемых данных в реальном времени.

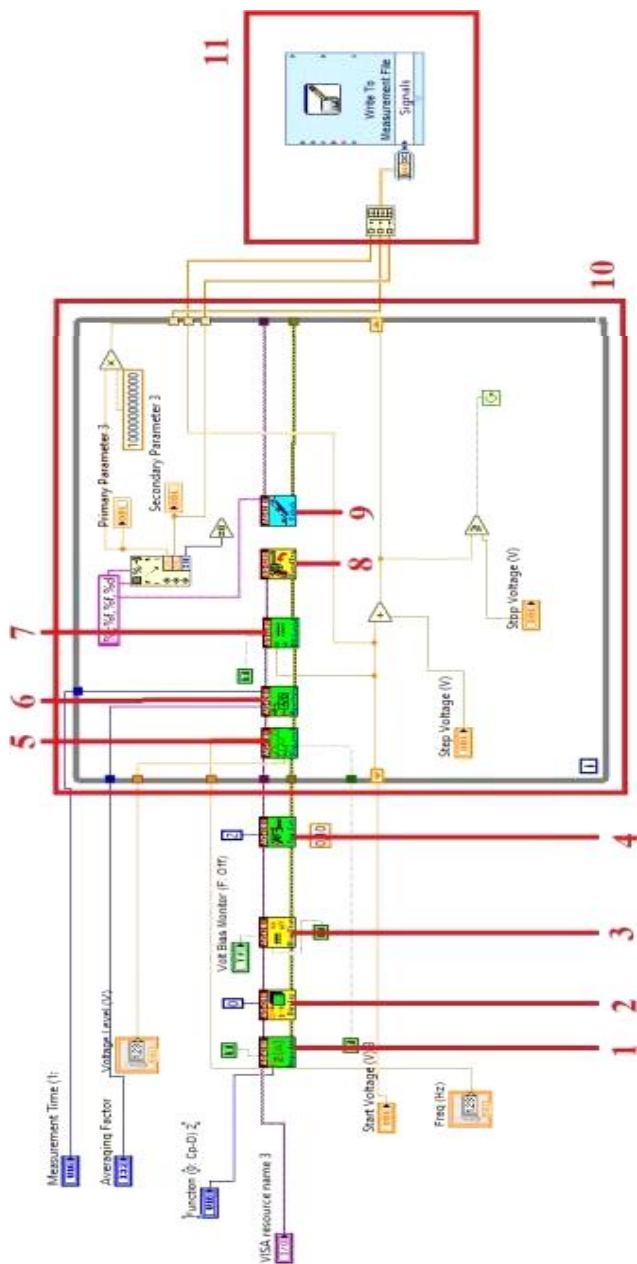


Рис. 1. Блок-диаграмма виртуального прибора

Заключение. Разработанное ПО было опробовано при измерениях ВФХ СИД в диапазоне напряжений от +2 до –5 В с шагом изменения 0,05 В. Частота, при которой проводились измерения, равна 1 кГц. Уровень напряжения – 50 мВ.

Результатом выполнения программы стала ВФХ, на которой наблюдалась некоторая волнистость, которая может свидетельствовать об изменении степени локализации носителей заряда в квантовых ямах. Из этого можно сделать вывод о корректности работы разработанного ПО. Однако перед проведением измерений необходимо выбрать определенные значения частоты и уровня напряжения, а также режима измерения по времени, для того чтобы все квантовые ямы визуально регистрировались. Для этого необходимо провести эталонные измерения. Результат оказался удовлетворительным, так как прослеживается почти полное совпадение с результатами, измеренными вручную.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврушко В.В. Исследование вольт-фарадных характеристик фоточувствительных структур на основе InGaAsSb / В.В. Гаврушко, А.Н. Григорьев, В.Г. Иванов // Вестник Новгородского гос. ун-та. – 2012.
2. Шумский И.А. Измерение вольт-фарадных характеристик полупроводниковых приборов // Современная измерительная техника. – 2017. – 10 с.
3. E4980A Precision LCR Meter [Электронный ресурс]. – URL: <http://agilent.com/find/e4980a> (дата обращения: 02.03.2024).

УДК 628.9.037

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ СИД НА ОСНОВЕ GAN

А.С. Степанова, И.А. Колупаев, Р.В. Васинцев, студенты

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

*Проект ГПО КАФ-2002. Изучение деградации светодиодных гетероструктур методом измерения ВАХ и свечения в области микротокков
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, Nastrenca2@mail.ru*

Для неразрушающей диагностики кристалла светоизлучающего диода (СИД) использован метод, основанный на анализе спектров фотолюминесценции (ФЛ). Благодаря данному методу появилась возможность отслеживать качество гетероструктуры СИД на основе GaN по фотооткликам слоев InGaN. Приведены результаты применения данной диагностики.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, спектры, спектроскопия, фотолюминесценция.

В настоящее время все актуальней становится задача импортозамещения, поэтому в АО НИИПП г. Томска стоит задача производства своих кристаллов светоизлучающих диодов (СИД) с параметрами, не уступающими зарубежным производителям. Однако, как показала практика, КПД кристаллов, изготовленных НИПП, существенно ниже, чем у купленных кристаллов. Поэтому встал вопрос о том, в чем кроется проблема: в недостатках технологии изготовления или же в качестве исходного материала (GaN-пластинах).

Известно, что спектроскопия фотолюминесценции (ФЛ) является удобным методом неразрушающего контроля получения информации о материалах, позволяя судить о качестве слоев, концентрации примеси, плотности собственных точечных дефектов и т.д. В данной работе приводятся результаты диагностики гетероструктуры СИД фотолюминесцентным методом.

Методика исследования и описание экспериментальной установки. При исследовании кристаллов СИД возникает проблема, связанная с малыми размерами кристалла, площадь которого может составлять доли квадратного миллиметра. Кроме того, фотолюминесцентный отклик от такого кристалла также очень слабый. С появлением высокочувствительных оптоволоконных спектрометров появилась возможность измерять спектры даже слабых источников света. Оптоволоконные спектрометры имеют детекторы, чувствительные в области от 200 до 1100 нм, при этом чувствительность их составляет 60–130 фотонов/отсчет при оптическом разрешении до 0,3 нм.

Для исследования спектров ФЛ кристаллов СИД была использована установка (рис. 1), включающая в себя источник питания, исследуемый образец, источник УФ-света, оптоволоконный спектрометр и ПЭВМ с ПО.

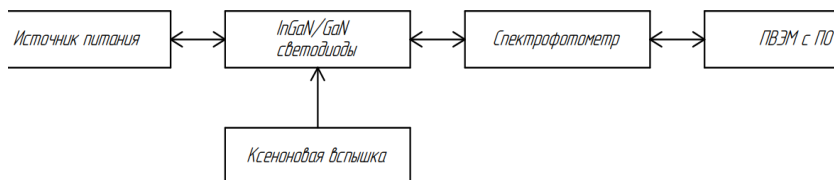


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для исследования спектров ФЛ

Перед началом измерения спектров фотолюминесценции в специализированном ПО Optosky Spectra устанавливается время накопления, задержки и другие параметры. Далее оптоволоконно подсоединяется к спектрофотометру, а торец оптоволоконного кабеля подносится

к кристаллу. При помощи ксеноновой лампы на исследуемый образец подается ультрафиолетовая вспышка и измеряется спектр ФЛ.

Результаты исследования и обсуждение. Были исследованы два образца: покупной фирмы Sanan (1), и произведенный АО НИИПП 4527014 (2) из покупных пластин. Полученные спектры фотолюминесценции двух образцов представлены на рис. 2.

Проанализировав полученные нами данные и сравнив их с литературными [1, 2], можем прийти к выводу, что второй пик у обоих образцов соответствует области InGaN. Интенсивность свечения фотолюминесценции в области InGaN сильнее у образца Sanan, что говорит о его большей эффективности в сравнении с образцом 4527014, что и реально наблюдается. Однако перед нами все еще стоит вопрос, с чем связан данный разброс в эффективности у покупного и собственно произведенного образца кристалла.

Полученных данных на данный момент недостаточно, чтобы сделать окончательный вывод о том, что виновата технология изготовления или же проблема в самой пластине.

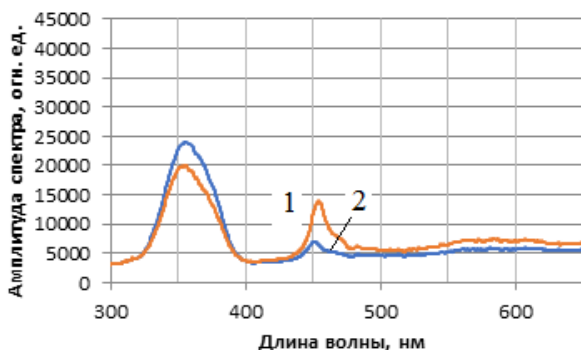


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции образцов СИД

Заключение. Данный метод позволяет проводить неразрушающую диагностику кристаллов, изготовленных из пластин с гетероструктурами InGaN/GaN от разных производителей.

Помимо приведенных в статье образцов, нами был исследован по такому же методу СИД с закороченной структурой. Как показали результаты, такой образец не дает отклик, что указывает на то, что отклик ФЛ зависит не только от качества пластины, но и от качества технологии изготовления и конечных параметров СИД (токов утечки и пр.).

Выражаем благодарность сотрудникам отдела № 110 АО «НИИПП» С.А. Санько, М.С. Майбах, Р.А. Гальченко за предоставленные образ-

цы для исследования, которые использовались в данной работе, и активное участие в обсуждении полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фотолюминесценция объемных кристаллов GaN, легированных Eu / В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, А.В. Насонов, С.Н. Родин // Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45, вып. 9.

2. Фотолюминесценция GaN/InGaN-множественных квантовых ям, сформированных наностержнях GaN / Н. Качалова, В. Войцехович, А. Мамута, В. Хоменко // Фотоника. – 2014. – № 1. – С. 43.

УДК 53.043

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУР С МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ НА ОСНОВЕ InGaN/GaN

*Д.Д. Кривошеина, И.А. Колупаев, Е.В. Парехина, студенты
Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф-м.н.
Проект КУДР-2002. Изучение деградации светодиодных гетеро-
структур методом измерения ВАХ и свечения в области микротоков
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, Krivosheina.D@yandex.ru*

Проведено сравнение результатов по определению квантовой эффективности гетероструктур различных производителей при помощи анализа характеристик фотолюминесценции слоев InGaN/GaN.

Ключевые слова: полупроводниковые пластины, гетероструктуры, фотолюминесценция, квантовые ямы.

Эпитаксиальные слои нитрида галлия играют все большую роль в создании приборов оптоэлектроники и осветительной техники. Квантовый выход электролюминесценции эпитаксиальных слоев связан с качеством активного слоя. Однако механизмы излучательной и безызлучательной рекомбинации в активном слое существенно зависят от методов и технологии эпитаксии различных производителей. От качества полупроводниковых пластин будет зависеть и эффективность изготавливаемых из них кристаллов светодиодов. Одними из самых информативных методов неразрушающей диагностики полупроводниковых наногетероструктур являются фотоэлектронные методы.

В данной работе приводятся результаты диагностики гетероструктуры фотолюминесцентным методом.

Описание экспериментальной установки. Методика исследования. Экспериментальная установка включает в себя источник света ультрафиолетового диапазона, образец полупроводниковой пластины и оптоволоконный спектрометр Optosky АТР3030. В качестве источ-

ника света используется светодиод с длиной волны 369 нм. Кванты света с такой длиной волны способны производить переходы зона–зона с шириной более 3,4 эВ, что достаточно для возбуждения фотолюминесценции любых полупроводниковых пластин на основе GaN. Исследовались полупроводниковые пластины разных производителей. Оптоволоконный спектрометр имеет высокую чувствительность, равную 1300 В/лк*с, диапазон измерений 200–1000 нм, время интегрирования 1–65535 мс, и оптическое разрешение 0,1–0,4 нм.

Чтобы получить достоверные результаты, необходимо обеспечить одинаковые условия проведения экспериментов. Для этого оптоволоконный кабель и ультрафиолетовый светодиод фиксируются в одном положении, а полупроводниковые пластины поочередно меняются, полученные данные записываются и сохраняются. Следует учесть, что характеристики фотолюминесценции следует измерять со стороны полупроводникового материала, а не со стороны сапфировой подложки.

Экспериментальные результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции различных полупроводниковых пластин. Как видно из рисунка, спектр состоит из двух типов полос (коротковолновая и длинноволновая). Коротковолновая полоса, судя по ее характеристикам, представляет собой, в основном, спектр светового потока ультрафиолетового излучателя, отраженного от пластины.

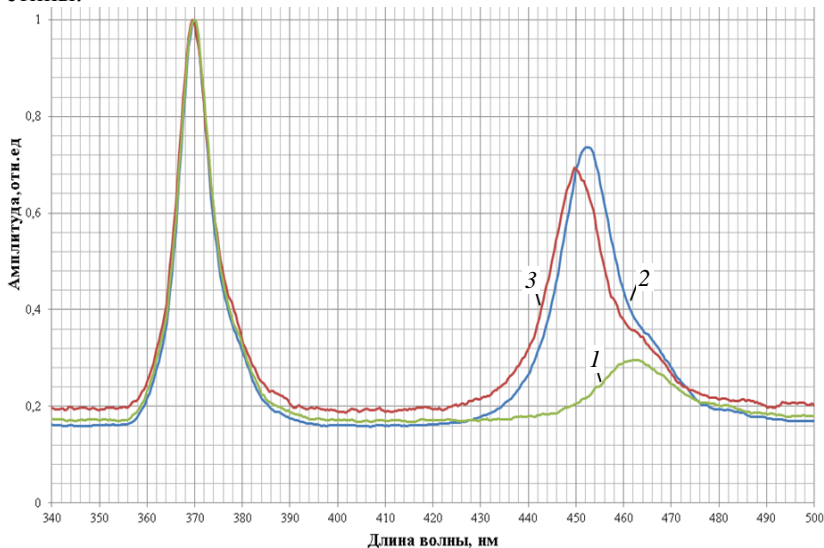


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции полупроводниковых пластин

Длинноволновая полоса представляет собой спектр фотолюминесценции пластин. У разных пластин разная длина волны люминесценции и разная интенсивность. Так, например, у пластины HOMRAY (1) длина волны равна 460 нм, у РАМ с диэлектриком (2) – 452 нм, а у РАМ без диэлектрика (3) длина волны составляет 449 нм. Такие разные показатели длины волны связаны с разной глубиной и шириной квантовых ям, которые зависят от концентрации индия в слое InGaN и толщины слоя. А значит, и от технологии изготовления полупроводниковых пластин. Амплитуда, в свою очередь, зависит от качества получаемых квантовых ям, т.е. от степени взаимодействия слоёв InGaN с буферными слоями и соседними квантовыми ямами (например, в конечном итоге, от токов утечки).

Как следует из рис. 1, полупроводниковые пластины РАМ (2 и 3) обладают примерно одинаковыми параметрами в отличие от HOMRAY (1), которая имеет не только другую длину волны, но и гораздо меньшую эффективность фотолюминесценции.

Заключение. Таким образом, данная методика в дальнейшем позволит проводить неразрушающую экспресс-диагностику полупроводниковых пластин и осуществлять более осознанный выбор из предлагаемых производителями вариантов.

Выражаем благодарность сотрудникам отд. №110 АО «НИИПП» С.А. Санько, М.С. Майбах, М.И. Воротникову, Ю.А. Хотненко, Р.А. Гальченко за предоставленные образцы для исследования, которые использовались в данной работе, и активное участие в обсуждении полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фотолюминесценция объемных кристаллов GaN, легированных Eu / В.В. Криволапчук, М.М. Мездрогина, А.В. Насонов, С.Н. Родин // Физика твердого тела. – 2003. – № 9.
2. Фотолюминесценция GaN/InGaN-множественных квантовых ям, сформированных на наностержнях GaN / Н. Качалова, В. Войцехович, А. Мамута, В. Хоменко // Photonics. – 2014. – № 1.
3. Фотолюминесценция квантовых ям GaN/AlN / И.А. Александров, Т.В. Малин, Д.Ю. Протасов, В. Pecz, К.С. Журавлев // Автометрия. – 2021. – № 5.

**ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ПУЛЬСА,
ДЫХАНИЯ И ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА
ВО СНЕ В УСТРОЙСТВАХ ПЕРСОНАЛЬНОГО
МОНИТОРИНГА ЗДОРОВЬЯ**

Д.С. Медведев, аспирант каф. ПрЭ

*Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, d.medvedev@redmadrobot.ru*

Проводится обзор современных способов регистрации частоты пульса, дыхания и двигательной активности человека в составе бытовых приборов. Приводится обобщенная структурная схема устройства мониторинга.

Ключевые слова: пульс, дыхание, двигательная активность, мониторинг сна, фотоплетизмография, актиграфия, баллистокардиография, биорадиолокация.

Оценка частоты пульса, дыхания и двигательной активности применяется в задачах персонального мониторинга здоровья в целом и сна в частности. На основе этих данных строятся алгоритмы расчета различных метрик, включая показатели качества сна, используемых для формирования рекомендаций по улучшению качества сна. Ниже перечислены основные методы регистрации первичной биоинформации.

Фотоплетизмография. Данный метод построен на основе оптической оценки кровенаполнения периферических артерий [1]. В одном из вариантов метода используется световой излучатель, воздействующий на открытый участок кожи при непосредственном контакте с ней, при этом с помощью фотодатчика оценивается модуляция отраженного света. Метод является наиболее массовым и применяется в большинстве смарт-часов, фитнес-браслетов и колец. Другой вариант метода для оценки пульса и дыхания, также иногда называемый видеоплетизмографией, использует видеопоток. Способ является бесконтактным, но требует существенных вычислительных мощностей. В данном методе остро встают вопросы этики и приватности, в связи с чем такие системы применяются ограниченно, в частности, для мониторинга детского сна [2].

Актиграфия. Под актиграфией понимается метод оценки двигательной активности человека с использованием различных датчиков. В клинической практике считается «серебряным» стандартом, а в составе носимых трекеров в контексте мониторинга сна [3] массовое применение нашли датчики ускорения (акселерометры), использу-

мые для мониторинга сна отдельно или совместно с оптическими датчиками.

Биорадиолокация. Метод основан на эффекте Доплера, при котором анализируется изменение частоты отраженных от движущегося объекта или его частей генерируемых излучателем радиоволн. Приборы, построенные на основе данного метода, располагаются на расстоянии от пользователя и являются бесконтактными [4]. Метод позволяет регистрировать малейшие движения, что дает возможность вычислять пульс, дыхание и движения.

Баллистокардиография (БКГ). Этот метод оценивает изменения в биомеханике тела, связанные с сердечной активностью [5]. В качестве сенсорных систем в данном методе могут использоваться пьезодатчики, пневматические и гидравлические системы, датчики давления, инклинометры и др.

На сегодняшний день метод БКГ стал де-факто техническим стандартом в области стационарного персонального мониторинга сна, так как является бесконтактным, безопасным, недорогим при массовом внедрении и позволяет достичь приемлемой точности при оценке качества сна [6].

Проведенный анализ существующих систем мониторинга сна позволяет построить упрощенную структурную схему такого устройства (рис. 1).

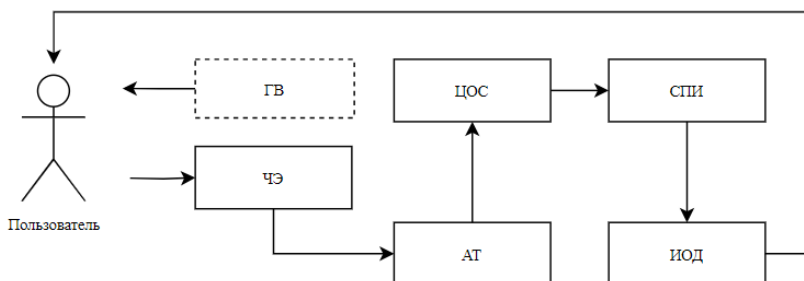


Рис. 1. Обобщенная структурная схема трекера сна

На схеме генератор воздействия ГВ является опциональным блоком, так как существуют пассивные (БКГ, видео) и активные системы (фотоплетизмография, биорадиолокация). Чувствительный элемент ЧЭ взаимодействует с пользователем и преобразует физиологические процессы в электрический сигнал, который, в свою очередь, преобразуется аналоговым трактом АТ. Далее аналоговый сигнал оцифровывается и проводится цифровая обработка сигнала ЦОС. После этого данные с помощью средств передачи информации СПИ (WiFi,

Bluetooth) отправляются в системы интерпретации и отображения данных ИОД, такие как смартфон или веб-системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Multi-stage sleep classification using photoplethysmographic sensor / M.A. Motin, C. Karmakar, M. Palaniswami, T. Penzel, D. Kumar // R. Soc. Open Sci. – 2023. – Vol. 10. – P. 221517.
2. Development of a non-contact sleep monitoring system for children / M. Kamon, S. Okada, M. Furuta, K. Yoshida // Front Digit Health. – 2022, Aug 8. – Vol. 4. – P. 877234.
3. Martin J.L. Wrist actigraphy / J.L. Martin, A.D. Hakim // Chest. – 2011, Jun. – Vol. 139 (6). – P. 1514–1527.
4. Doppler Radar-Based Non-Contact Health Monitoring for Obstructive Sleep Apnea Diagnosis^ A Comprehensive Review. Big Data Cogn. / V.P. Tran, A.A. Al-Jumaily, S.M.S. Islam // Comput. – 2019. – Vol. 3, No. 3.
5. Sadek I. Contactless remote monitoring of sleep: evaluating the feasibility of an under-mattress sensor mat in a real-life deployment / I. Sadek, B. Abdulrazak // Health Syst (Basingstoke). – 2022 May 8. – Vol. 12 (3). – P. 264–280.
6. Ahmed N. et al. Classification of Sleep-Wake State in Ballistocardiogram system based on Deep Learning // 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). – Glasgow, Scotland: United Kingdom, 2022. – P. 1944–1947.

УДК 57.087

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УСТРОЙСТВА БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОФИЛАКТИКИ СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА

А.В. Неустров, студент

*Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, stalker@main.tusur.ru*

Программное обеспечение разработано в среде программирования LabVIEW. Приведено описание блочной диаграммы и лицевой панели программы. Внутри блочной диаграммы были описаны основной цикл, блок статистики и блок выбора, определяющий последовательность действий с аудиофайлами.

Ключевые слова: LabVIEW, программное обеспечение, датчик, биологическая обратная связь.

В настоящее время существуют следующие методы в диагностике хронического стресса: биохимические и психофизиологические. Однако эти методы или инвазивные, или требуют подсоединения к человеку большого количества контактов, проведения биохимических анализов и, кроме того, на их проведение требуются временные затра-

ты. Поэтому бесконтактные методы, позволяющие диагностировать стрессовое состояние человека в режиме онлайн, являются актуальными.

Используемый пассивный радиоизотопный метод [1] не требует введения в организм человека радиоактивных веществ. Организм человека сам обладает некоторым количеством радиоактивных веществ. В частности, в крови содержится радиоактивный изотоп калия К-40. При изменении активности органов будет наблюдаться изменение интенсивности радиоактивного излучения. Применение пассивного радиоизотопного метода позволяет проводить бесконтактную оценку психофизиологического состояния человека. Профилактику хронического стресса предполагается проводить через прослушивание музыкальных композиций разных жанров.

В данной работе разработано программное обеспечение в среде программирования LabVIEW, которое будет оценивать текущее психофизиологическое состояние человека и предлагать мультимедийные файлы для его коррекции.

Описание программы. Любая графическая программа в среде программирования LabVIEW содержит лицевую панель и блочную диаграмму. Далее будут рассмотрены блочная диаграмма и лицевая панель данной программы (рис. 1, 2).

Для работы с датчиком данная программа использует протокол VISA. Данный протокол позволяет считывать данные с СОМ-порта. В качестве датчика используется газоразрядный датчик радиоактивного излучения [1].

Первый цикл имеет по 2 входа и выхода. На вход поступают адрес СОМ-порта и время начала работы программы в миллисекундах. Данные с СОМ-порта предварительно освобождаются от накопленных на микросхеме данных, затем считывается то, что пришло после сброса. Принятые данные отправляются на блок гистограммы и на выход цикла с накоплением данных для создания массива.

Время, приходящееся на вход цикла, статично и не начинается с нуля, но время внутри цикла постоянно растет. Для определения времени работы цикла производится вычитание времени вне цикла от времени внутри. Данное значение переводится в секунды и округляется в меньшую сторону, а затем выводится на лицевую панель и на оператор сравнения. Внутри цикла также есть 3 элемента управления: кнопка завершения цикла, переключатель для сохранения данных и время, в течение которого цикл будет работать.

Если это число равно нулю, цикл будет работать до нажатия кнопки завершения цикла. Переключатель определяет, будут ли данные сохранены с завершением цикла или нет.

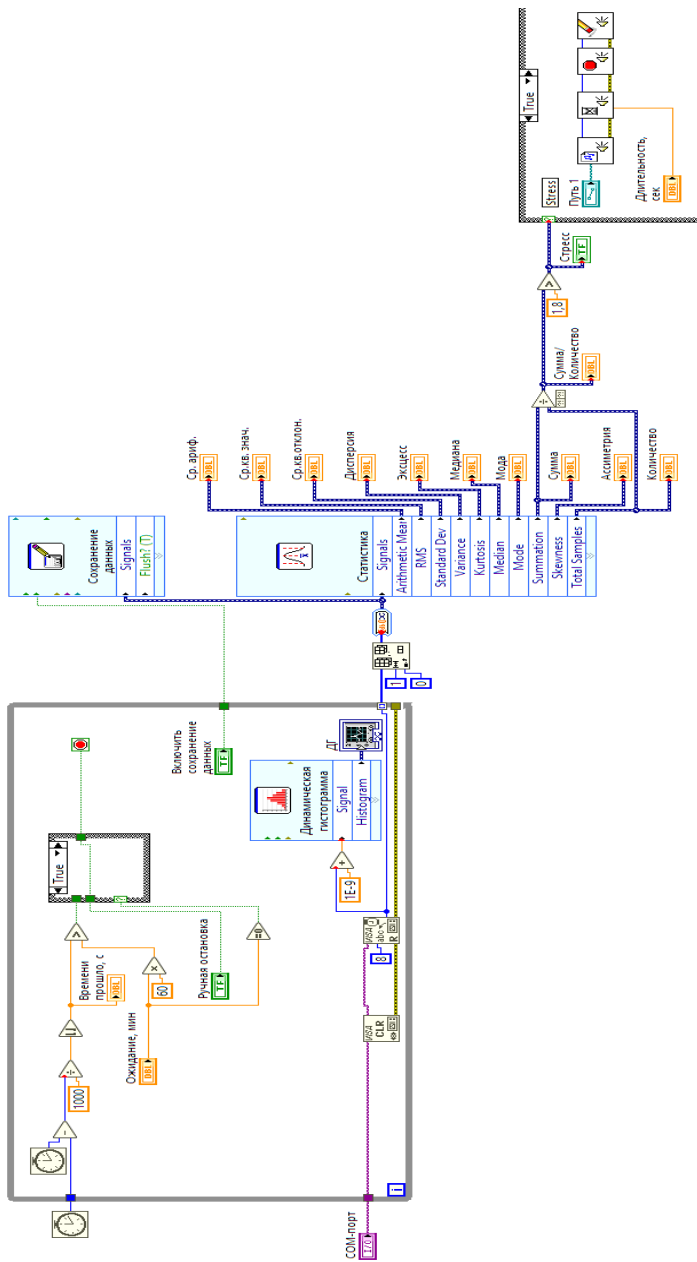


Рис. 1. Блочная диаграмма

Далее следует блок статистической обработки данных. Блок статистики собирает данные из массива, вычисляет необходимые значения (среднее значение, дисперсию, коэффициент асимметрии, эксцесс и др.) и выводит их на лицевую панель.

За блоком статистики следует блок выбора (принятия решений). Данный блок получает на вход сигнал TRUE/FALSE и в соответствии с ним определяет последовательность действий. В данном случае действия отличаются лишь путем к файлу аудио и его продолжительностью, которые необходимо задавать вручную.

Принцип работы заключается в воспроизведении аудиофайла в течение заданного периода времени и задержки работы программы до конца воспроизведения. Затем аудиофайл останавливается и закрывается.

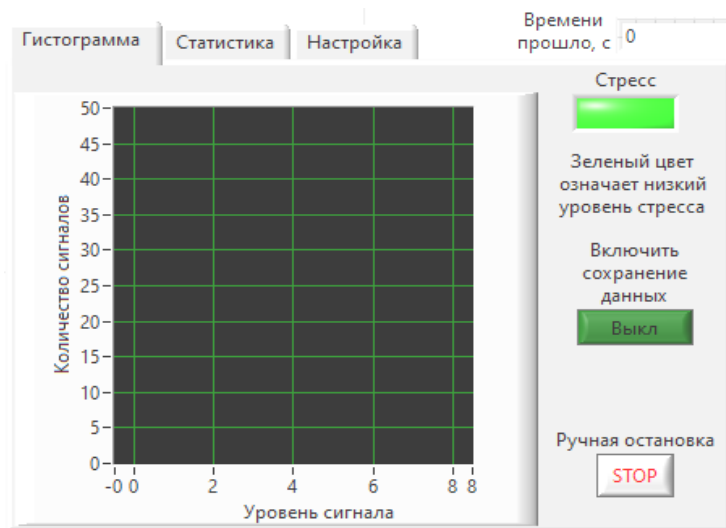


Рис. 2. Внешний вид лицевой панели

На вкладке гистограммы (см. рис. 2) показаны 4 элемента – гистограмма, индикатор стресса (изначально зеленый), переключатель сохранения данных и кнопка ручной остановки цикла. Гистограмма получает значения, обрабатывает и отображает в реальном времени. Индикатор стресса меняет свое значение после обработки данных блоком статистики. Если цвет не изменился, значит уровень стресса низкий. Кнопка ручной остановки передает сигнал остановки на цикл, отправляя полученные данные на блок статистики и воспроизводя аудиофайл в соответствии с уровнем стресса.

Переключатель в неактивном состоянии («Выкл») отправляет сигнал «False» на блок записи данных, тем самым запрещая ему сохранять полученные данные. Иначе данные будут записаны в C:\Выходные документы\exit0.xlsx. Если файл exit0 уже есть, будет использовано следующее доступное название.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ физиотерапии человека с использованием биологической обратной связи: пат. 2336914 Рос. Федерация / С.Г. Еханин, В.А. Молошников, И.А. Ярымова; заявл. 12.10.06; опубл. 27.10.08.

ПОДСЕКЦИЯ 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – Лоцилов А.Г., проректор по НРиИ,
зав. каф. КУДР, к.т.н.;*
зам. председателя – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.

УДК 621.372

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФИЛЬТРА НЕОТРАЖАЮЩЕГО ТИПА НА СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ С НЕОДИНАКОВЫМИ НАГРУЗКАМИ, ФОРМИРУЮЩИМИ ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ

Т.А. Чепко, магистрант; Е.В. Санников, студент;

Г.А. Малютин, магистрант

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

Рассматривается неотражающий полосно-пропускающий фильтр, представленный направленным ответвителем с нагрузками в виде RLC-цепей, включенных в его диагональные плечи. Описывается вывод аналитического решения для определения частотных зависимостей данных нагрузок, примененного и в случае равенства, и в случае отличия RLC-цепей. Особо интересен последний случай с неодинаковыми фильтрующими звеньями, так как при таком подходе достигается большая ширина полосы пропускания фильтра.

Ключевые слова: RLC-цепи, неравные нагрузки, неотражающий фильтр, обратная задача, математическая модель, связанные линии, направленный ответвитель.

Цель данной работы заключается в решении прямой и обратной задачи нахождения частотных характеристик фильтров неотражающего типа (ФНТ) на связанных полосковых линиях (СПЛ) при известных параметрах конструкции и материалов (прямая задача) или нахождении параметров RLC-цепи по задаваемым частотным характеристикам фильтра (обратная задача). Рассматривается общий случай неравенства параметров фильтрующих звеньев в виде RLC-цепи, включенных в диагональные порты направленного ответвителя (НО) на СПЛ. Работа содержит результаты исследований, продолжающих те-

матику работ [1–5]. Так, в работе [1] было описано решение частного случая ФНТ на СПЛ с одинаковыми диагональными нагрузками z_2 и z_3 (рис. 1). Исследуемая эквивалентная схема фильтра на рис. 1, которая также рассматривалась в работах [1–5], представлена в виде производного четырехполосника от каскадного соединения восьми-полосников [6]. Матрицы передачи $a1$ и $a3$ описывают влияние частотно-зависимых нагрузок z_2 и z_3 , матрица a описывает распределенный участок схемы в виде связанных линий I и II. Получение из представленных частей эквивалентной схемы на рис. 1 общей классической матрицы передачи ap описывается в работе [2], на основе которой была разработана программа [3] для анализа ФНТ, исходными данными которой служат параметры СПЛ и фильтрующих звеньев.

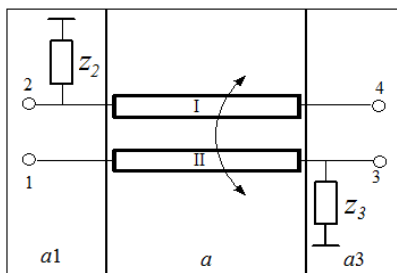


Рис. 1. Эквивалентная схема неотражающего фильтра, представленного связанными полосковыми линиями, нагруженными на сопротивления z_2 и z_3

Процесс получения выражения, связывающего матричные параметры связанных полосковых линий и частотно-зависимые сопротивления z_2 и z_3 фильтрующих звеньев для случая, когда $z_2 = z_3 = z$, описан в работах [4, 5]. Для случая, когда $z_2 \neq z_3$, матрица четырёх-полосника ap записывается так:

$$ap_{11} = \frac{a12[a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2] - (a11 + a13 \cdot g3)(a42 + a22 \cdot g2)}{a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2}, \quad (1)$$

$$ap_{12} = \frac{a14[a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2] - (a11 + a13 \cdot g3)(a22 + a24 \cdot g2)}{a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2}, \quad (2)$$

$$ap_{21} = \frac{a32[a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2] - (a31 + a11 \cdot g3)(a42 + a22 \cdot g2)}{a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2}, \quad (3)$$

$$ap_{22} = \frac{a21[a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2] - (a31 + a11 \cdot g3)(a22 + a24 \cdot g2)}{a32 + g3(a12 + a14 \cdot g2) + a21 \cdot g2}. \quad (4)$$

Матрица ap может быть выведена аналитически как в выражениях (1)–(4), так и экспериментально, как измеряемые коэффициенты матрицы рассеяния ФНТ S . Получаемая путем перехода от матрицы S , по преобразованиям из [6], матрица передачи обозначена как Ae . Приравнявая и преобразовывая, по аналогии с [4, 5], аналитически полученную и преобразованную из экспериментальных данных матрицы передачи ФНТ, получим систему уравнений относительно g_2, g_3 :

$$\begin{cases} v_1 \cdot g_2 + v_2 \cdot g_3 + v_3 \cdot g_2 \cdot g_3 = v_4; \\ v_5 \cdot g_2 + v_6 \cdot g_3 + v_7 \cdot g_2 \cdot g_3 = v_8; \\ v_9 \cdot g_2 + v_{10} \cdot g_3 + v_{11} \cdot g_2 \cdot g_3 = v_{12}; \\ v_{13} \cdot g_2 + v_{14} \cdot g_3 + v_{15} \cdot g_2 \cdot g_3 = v_{16}, \end{cases} \quad (5)$$

где коэффициенты $v_1 - v_{16}$ определяются через коэффициенты матрицы передачи a направленного ответвителя, и элементы матрицы Ae – экспериментально полученную матрицу фильтра:

$$\begin{aligned} v_1 &= a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} + a_{21} \cdot Ae_{11}; & v_2 &= Ae_{11} \cdot a_{12} - a_{12}^2 + a_{13} \cdot a_{42}; \\ v_3 &= a_{13} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{14} + a_{14} \cdot Ae_{11}; & v_4 &= a_{12} \cdot a_{32} - a_{11} \cdot a_{42} - a_{32} \cdot Ae_{11}; \\ v_5 &= a_{11} \cdot a_{24} - a_{21} \cdot a_{14} + a_{21} \cdot Ae_{12}; & v_6 &= a_{13} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{14} + a_{12} \cdot Ae_{12}; \\ v_7 &= Ae_{12} \cdot a_{14} - a_{14}^2 + a_{13} \cdot a_{24}; & v_8 &= a_{14} \cdot a_{32} - a_{11} \cdot a_{22} - a_{32} \cdot Ae_{12}; \\ v_9 &= a_{22} \cdot a_{31} - a_{21} \cdot a_{32} + a_{21} \cdot Ae_{21}; & v_{10} &= a_{11} \cdot a_{42} - a_{12} \cdot a_{32} + a_{12} \cdot Ae_{21}; \\ v_{11} &= a_{11} \cdot a_{22} - a_{14} \cdot a_{32} + a_{14} \cdot Ae_{21}; & v_{12} &= a_{32}^2 - Ae_{21} \cdot a_{32} - a_{31} \cdot a_{42}; \\ v_{13} &= Ae_{22} \cdot a_{21} - a_{21}^2 + a_{31} \cdot a_{24}; & v_{14} &= a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21} + a_{12} \cdot Ae_{22}; \\ v_{15} &= a_{11} \cdot a_{24} - a_{21} \cdot a_{14} + a_{14} \cdot Ae_{22}; & v_{16} &= a_{21} \cdot a_{32} - a_{22} \cdot a_{31} - a_{32} \cdot Ae_{22}. \end{aligned}$$

Предложено два варианта решения системы уравнений (5).

Первый способ – подстановкой с последующим решением квадратного уравнения.

После подстановки было получено квадратное уравнение

$$\begin{aligned} (v_4 \cdot v_5 - v_1 \cdot v_8) + (v_4 \cdot v_7 - v_2 \cdot v_5 + v_1 \cdot v_6 - v_3 \cdot v_8) \cdot g_3 + \\ + (v_3 \cdot v_6 - v_2 \cdot v_7) \cdot g_3^2 = 0. \end{aligned}$$

Решением системы по данному способу стали следующие корни:

$$\begin{aligned} g_{3,1,2} = \frac{-(v_4 \cdot v_7 - v_2 \cdot v_5 + v_1 \cdot v_6 - v_3 \cdot v_8) \pm \\ \pm \sqrt{(v_4 \cdot v_7 - v_2 \cdot v_5 + v_1 \cdot v_6 - v_3 \cdot v_8)^2 - 4(v_3 \cdot v_6 - v_2 \cdot v_7)(v_4 \cdot v_5 - v_1 \cdot v_8)}}{2 \cdot (v_3 \cdot v_6 - v_2 \cdot v_7)}, \quad (6) \end{aligned}$$

$$g_{2,1,2} = \frac{v_4 - v_2 \cdot g_{3,1,2}}{v_1 + v_3 \cdot g_{3,1,2}}. \quad (7)$$

Второй способ – решение по формулам Крамера.

Так как система (5) переопределена, были использованы только три уравнения из четырех. По ним были записаны основная матрица D и дополнительные матрицы G_2 и G_3 :

$$D = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \\ v_5 & v_6 & v_7 \\ v_9 & v_{10} & v_{11} \end{bmatrix}; \quad G_2 = \begin{bmatrix} v_4 & v_2 & v_3 \\ v_1 & v_6 & v_7 \\ v_{12} & v_{10} & v_{11} \end{bmatrix}; \quad G_3 = \begin{bmatrix} v_1 & v_4 & v_3 \\ v_5 & v_8 & v_7 \\ v_9 & v_{12} & v_{11} \end{bmatrix}.$$

Корни находятся как отношение определителей дополнительных матриц к определителю основной:

$$g_2 = \frac{|G_2|}{|D|}; \quad g_3 = \frac{|G_3|}{|D|}. \quad (8)$$

Представленные решения (6)–(8) являются вариантами решения задачи определения частотных зависимостей комплексных сопротивлений разных фильтрующих звеньев $z_2(f) = g_2(f)^{-1}$, $z_3(f) = g_3(f)^{-1}$. В свою очередь не одинаковые нагрузки z_2 и z_3 при проектировании ФНТ позволяют достичь большую ширину полосы пропускания. Данная задача является обратной, и в качестве исходных данных требуются известные матрицы передачи неотражающего фильтра и направленного ответвителя, которые можно получить либо экспериментальным путем, либо путем математического моделирования.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Maljutin N.D. Circuits of combined absorptive filters / N.D. Maljutin, A.G. Loschilov, A.A. Ladur // 2008 CriMiCo – 18th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. – Sevastopol, Ukraine, 2008. – P. 489–490.
2. Воробьев П.А. Квази-Т-волны в устройствах на связанных полосковых линиях с неуровненной электромагнитной связью / П.А. Воробьев, Н.Д. Малютин, В.Н. Федоров // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, № 9. – С. 1711–1718.
3. Программа расчёта частотных характеристик полосно-пропускающих фильтров поглощающего типа / Малютин Н.Д., Лоцилов А.Г., Тхань То.Ч. Св-во о регистр. программы для ЭВМ 2021663377, 16.08.2021. Заявка № 2021662557 от 12.08.2021.

4. Лошилов А.Г. Применение метода автономных блоков к математическому моделированию СВЧ-устройств, содержащих цепи распределено-сосредоточенного типа / А.Г. Лошилов, Н.Д. Малютин, Т.Т. Чинь // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 61–67.

5. Чепко Т.А. Решение задачи синтеза частотной характеристики RLC-цепи фильтра неотражающего типа на основе связанных полосковых линий / Т.А. Чепко, Т.Т. Чинь, Г.А. Малютин // По матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная секция ТУСУР – 2023», 17–19 мая 2023 г. – Томск: В-Спектр, ТУСУР, 2023. – Ч. 1. – С. 207–210.

6. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1971. – 388 с.

УДК 621.317

ЧЕТЫРЁХКАНАЛЬНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОП

Д. Горобец, студент каф. 404 МАИ

Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 410 МАИ

г. Москва, МАИ, dgorobet3@gmail.com

Разработано устройство, позволяющее по спектру вибраций механизма обнаруживать дефекты в подшипниках и валах без остановки производственного процесса и проведены эксперименты с ним.

Ключевые слова: дефектоскоп, виброакустический метод, ультразвук, эксперимент, прототип.

В современной промышленности активно используется передача момента с помощью крутящихся валов. Это могут быть различные двигатели, линии транспортировки, внутренние части насосов и эксгрудеров. Для уменьшения потерь на силы трения используются разные технические решения, самым распространённым из которых являются подшипники качения.

Для анализа износа подшипников можно использовать различные методы дефектоскопии. Один из них основывается на использовании ультразвукового излучателя и приёмника. Такой метод обладает рядом недостатков: необходимость остановки процесса для извлечения подшипника, низкая скорость анализа.

Другой подход – виброакустический метод неразрушающего контроля, который позволяет осуществлять измерения, не извлекая подшипники, и не требует остановки работы станка [1]. Данный метод применим ко многим процессам [2] и, в частности, может быть рассмотрен в рамках задачи данной работы. В СКБ 4 «Сигнал» МАИ было разработано устройство, которое использует такой подход и позволяет решать задачу дефектоскопии подшипников без остановки про-

изводства. Устройство располагается где-либо на корпусе машины вблизи анализируемого подшипника. Щуп с сенсором прикрепляется непосредственно в самую близкую к подшипнику точку корпуса.

Структурная схема данного устройства приведена на рис. 1.

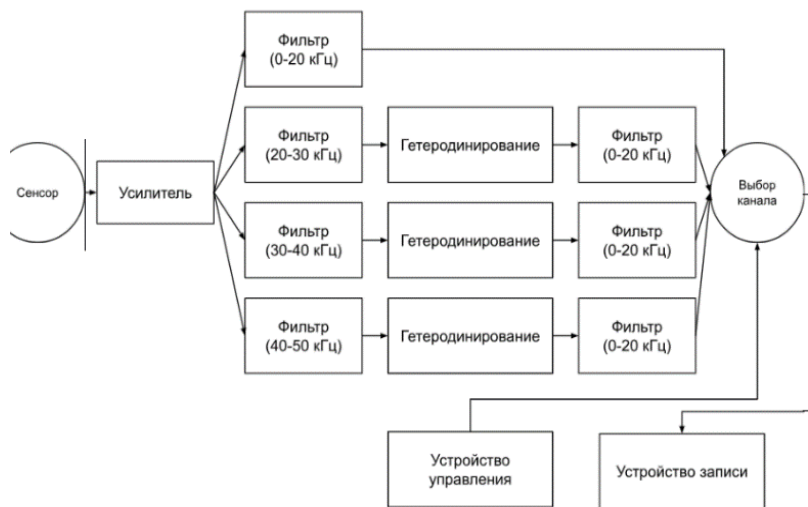


Рис. 1. Структурная схема устройства

Воспринимаемый сенсором сигнал передаётся на усилитель, от туда на один из 4 каналов, анализирующий вибрации в диапазонах от 0 до 20 кГц, от 20 до 30 кГц, от 30 до 40 кГц и от 40 до 50 кГц соответственно. Анализ на разных частотах позволяет исследовать подшипники, работающие с различной частотой вращения.

Особенностью устройства является в том числе возможность регистрации ультразвуковых колебаний, которые переносятся в слышимый диапазон и могут быть записаны и обработаны с помощью стандартных аппаратных средств записи звука.

Применяемые методы дефектоскопии подробно описаны в [3]. При анализе спектра вибраций вращающегося тела можно выделить следующие типы составляющих частот: резонансная, оборотная, негармоническая, зубцовая, а также субгармоники, вибрации электрического происхождения и шумы.

На основании дополнительной информации об исследуемом механизме может быть составлен перечень ожидаемых спектральных составляющих, и появление побочных спектральных компонент будет свидетельствовать об износе конструкции.

С помощью прототипа разработанного устройства была произведена запись нескольких механизмов в условиях реального производства (рис. 2). Полученные результаты в данный момент находятся в стадии обработки.

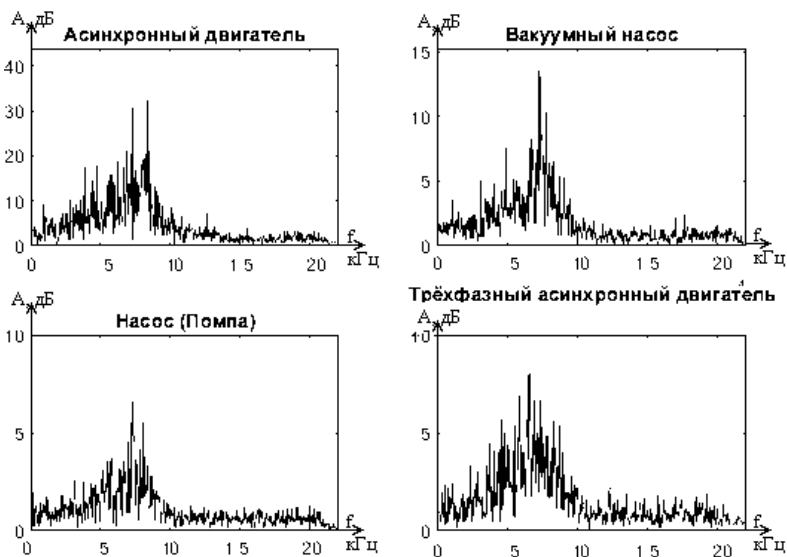


Рис. 2. Спектр акустических сигналов реальных механизмов

На данном этапе разработки анализ проводится отдельно на ЭВМ, но впоследствии при сборе достаточного количества данных возможно внедрение в устройство собственного анализатора, например в форме цифрового сигнального процессора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. – Пермь, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vibrocenter.ru/book6.html>
2. Горобец Д. Использование ультразвука для обнаружения дефектов в бытовых и промышленных приборах // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2023. – № 6. – С. 122.
3. Спектральный анализ вибрации. Лекция 14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://eam.su/lekciya-14-spektralnyj-analiz-vibracii.html>, свободный (дата обращения: 25.02.2024).

ЦИКЛИЧЕСКИЙ СИНХРОНИЗАТОР СТРОБОСКОПИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Сагдиев, студент ПИИШ;

Е.И. Тренкаль, к.т.н., доцент каф. КУДР

г. Томск, ТУСУР, andreySagdiyev.442@gmail.com

Приведена и описана структурная схема циклического синхронизатора, предназначенного для применения в стробоскопических измерительных системах, и выполняющая функции: 1) организации тактирующих сигналов для режимов взаимодействия с памятью рефлектометрического устройства по управляющей команде; 2) установки и фиксации начального времени измерения. Циклический синхронизатор разрабатывается как составная часть рефлектометра импульсного уровнемера и является новаторским решением. В рамках данной статьи представлена структурная схема циклического синхронизатора, описан принцип её работы, показана временная диаграмма, полученная в результате моделирования и подтверждающая работоспособность предложенного решения.

Ключевые слова: синхронизация, стробоскоп, осциллограф, приемник, частота, рефлектометрия.

Измерение периодических сигналов сверхкороткой длительности (менее 100 пс) требует применения нестандартных технических подходов ввиду невозможности применения методов прямой оцифровки. Одним из известных и зарекомендовавших себя подходов является стробоскопический режим измерения. Как известно из [1], стробоскопический режим обеспечивается за счет очень близкой частоты фиксирования мгновенных напряжений на приемнике относительно частоты повторения исследуемого сигнала.

В рамках работ по разработке рефлектометра импульсного уровнемера поставлена индивидуальная задача: разработать схему синхронизации, реализующую цикл выборки напряжений на приемнике по принципу стробоскопического измерения. Предметом обсуждения данной статьи является один из блоков схемы – циклический синхронизатор, выполняющий функцию запуска однократного цикла стробоскопического измерения по внешней команде. Такая команда может быть получена от управляющего микроконтроллера или внешнего цифрового устройства.

Циклический синхронизатор управляет генератором и принимающей цепью так, чтобы при получении команды измерения с момента совпадения фронтов тактирующих сигналов для элементов генерации

и приема запускался процесс записи данных в память устройства. Структурная схема устройства представлена на рис. 1.

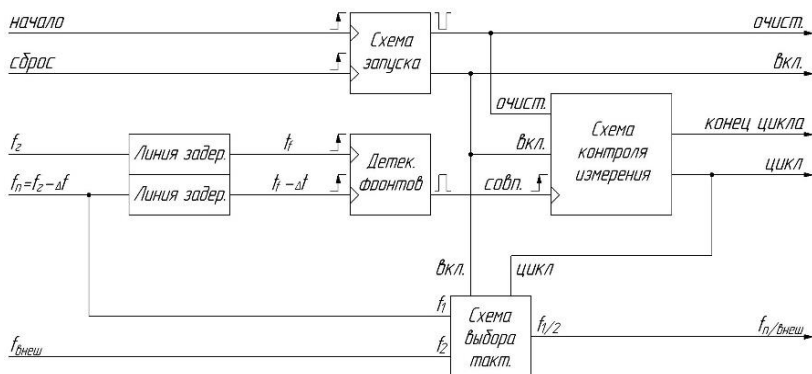


Рис. 1. Структурная схема циклического синхронизатора:

f_1 – частота тактирования генератора; $f_п$ – частота тактирования приемника;
 Δf – разница двух близких частот; t_f – момент фронта импульса;
 Δt – интервал дискретизации; $f_{внеш}$ – внешняя частота тактирования

В структурную схему входят следующие блоки:

1. *Схема запуска.* Выполняет функцию запуска однократного цикла стробоскопического измерения.

2. *Детектор фронтов.* Сигнализирует о наступлении начала цикла измерения по совпадению фронтов тактовых сигналов приёмника и генератора.

3. *Схема выбора тактирования.* Основным назначением схемы является мультиплексирование тактирующих сигналов для инкрементации адреса запоминающего устройства: в процессе стробоскопического цикла должна выполняться запись измеренных значений с частотой f_n , в остальное время, например для чтения, может быть использовано внешнее тактирование $f_{внеш}$.

4. *Схема контроля измерения.* Выполняет основную функцию по управлению процессом, формируя сигналы о начале и конце стробоскопического цикла, поступающие к управляющему устройству, цепям измерения и схеме выбора источника тактирования.

Запаздывание перехода в состояние совершения цикла компенсируется элементами задержки на входе детектора фронтов, вносящими разные задержки, отличающиеся на кратную величину от интервала дискретизации ($n \cdot \Delta f$).

На рис. 2 представлена временная диаграмма цифровой модели циклического синхронизатора, на которой можно наблюдать принцип

действия устройства. Детектор фронтов, имеющий аналоговую схемотехнику, в модели замещен генератором импульсов.

Выполнение основной функции циклического синхронизатора начинается по нарастающему фронту на входе «начало» (begin), порождающего короткий инвертированный импульс сброса/очистки, тот же самый импульс генерируется при подаче фронта на вход «сброс» (reset). После сброса цепь «вкл.» (enable) переводится в истинное состояние. С момента включения схема контроля измерения ждет сигнал от детектора фронтов «совп.» (det) о совпадении во времени фронтов двух тактирующих сигналов с близкими частотами. По первому сигналу от детектора схема контроля начинает стробоскопический цикл измерения, переводя выход «цикл» (cycle) в истинное состояние. По второму сигналу от детектора измерение заканчивается, «цикл» принимает ложное значение, выход «конец цикл» переводится в истинное состояние.

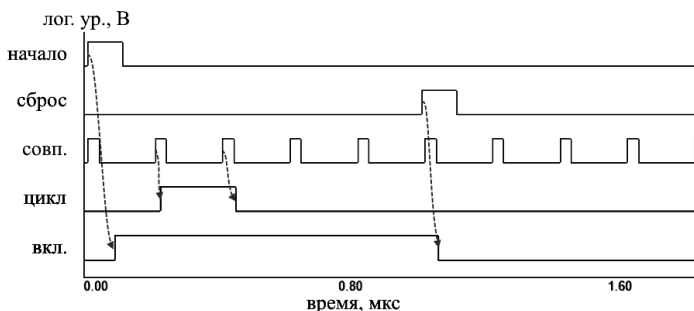


Рис. 2. Временная диаграмма состояний циклического синхронизатора

Циклический синхронизатор возможно использовать в составе разных комбинаций: например, подключить выход «цикл» к микроконтроллеру, который будет запоминать мгновенные напряжения на интегрированном АЦП по истинному состоянию от «цикл»; или же использовать в комбинации счетчика внешние ОЗУ и АЦП, подключив тактирующий выход к счетчику. Через цепи «вкл.» или «цикл» включать и отключать генерацию и компоненты приема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябинин Ю.А. Стробоскопическое осциллографирование. – М.: Сов. радио, 1972. – 271 с.
2. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 3 т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – Т. 2; пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 371 с.

ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ТЕРМОГРАММ ВЕЙВЛЕТ- ФУНКЦИЯМИ

А.С. Нечаев, доцент, к.т.н.; И.Е. Тоскина, аспирант

г. Самара, ФГБОУ ВО «СамГТУ», каф. РТУ, toskina_samgtu@mail.ru

Рассмотрен способ восстановления локальных во времени информационных сигналов, использующихся в дифференциальных сканирующих калориметрах (ДСК) на основе вейвлет-функции. Предложен метод аппроксимации сигналов ДСК с использованием вейвлет-функции. Проверена применимость метода для однопикового и многопикового сигналов.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, однопиковый сигнал, многопиковый сигнал, вейвлет-аппроксимация, помехи.

Одним из наиболее точных на сегодняшний день методов дифференциального термического анализа является метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) высокого разрешения [1]. Этот метод может быть применим для идентификации твердых и жидких веществ по получаемым термограммам. Зависимости «температура образца – время» и «дифференциальная температура – время» полученные после аналогово-цифрового преобразования на выходе прибора ДСК, записываются в базу данных информационно-измерительной системы (ИИС). Набор данных, переданных в ИИС, содержит информационный сигнал, шумы, присущие процессу измерений, а также искажения сигнала, вызванные тепловой инерционностью калориметра. Для точного измерения требуется устранить шумы и корректно учесть инерцию.

На данный момент традиционные подходы к обработке сигналов с ДСК содержат в своей основе преобразование Фурье и аппроксимацию рядами.

Преобразование Фурье (спектральный анализ сигналов) довольно просто реализуется с помощью современных информационных систем, поскольку имеется широкий класс разновидностей данного метода. Однако при всех имеющихся модификациях преобразование Фурье образует достаточно существенную погрешность аппроксимации конечных по времени (импульсных) сигналов, каким являющаяся термограмма, а также шум в виде импульсов большой интенсивности (относительно основного сигнала) и малой длительности [2].

Вейвлет-преобразование видится более предпочтительным по сравнению с традиционными преобразованиями, потому что опирается на базовую модель, представляющую импульсную функцию опре-

деленной формы. Из этого следует, что описание термограмм, представляющих собой конечный и достаточно короткий по времени сигнал, удобнее описывать комбинацией вейвлет-образов.

Таким образом, актуальным является вопрос разработки ИИС, которая самостоятельно получает набор данных с калориметра ДСК, устраняет заданным методом из сигнала помехи, принимая во внимание тепловую инерцию устройства, аппроксимирует данные в вейвлет-функцию с предварительно заданной погрешностью вычислений и сравнивает модель с образцом из базы данных ИИС устройства.

Как внутреннее устройство ДСК, так и влияние внешних воздействий определяют наличие аддитивного шума, накладывающегося на информационный сигнал. Анализ полученного сигнала необходимо осуществлять с учетом основных численных параметров шума, к которым относятся математическое ожидание, дисперсия и СКО, которые можно оценить при проведении пробных испытаний или при проведении калибровки прибора.

Таким образом, при построении модели необходимо учитывать систематические и стохастические погрешности, а также тепловую инерцию прибора ДСК.

Систематические погрешности поддаются математическому описанию и могут быть определены экспериментально. Полученное значение приводится в справочных данных на каждый прибор.

Стохастические погрешности носят случайный характер, являются в достаточной степени непредсказуемыми и могут меняться очень быстро [3].

Для анализа многопикового сигнала, характерного для многокомпонентных веществ, вейвлет-преобразование вычисляется отдельно для каждого пика на участке его локализации. Это приводит к необходимости проведения расчетов, количество которых пропорционально количеству пиков термограммы, что может нести за собой определенные вычислительные трудности. Однако относительная сложность вейвлет-преобразования компенсируется высокой производительностью современных ИИС.

После аппроксимации реального сигнала суммой вейвлетов необходимо оценить погрешность аппроксимации. Аппроксимация считается выполненной с необходимой точностью, если вычисленная погрешность становится меньше или равной заданной.

Проведенный анализ показывает возможность применения вейвлет-преобразования для проведения анализа однопиковых и многопиковых сигналов с заданной погрешностью. Это дает основание для дальнейшего развития данной темы – построение ИИС калори-

метра ДСК с возможностью использования вейвлетов для анализа сигналов и последующей идентификации веществ по анализу этих сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мощенский Ю.В. Дифференциальный термический анализ высокого разрешения в физикохимии гетерогенных конденсированных систем: автореф. дис. ... д-ра хим. наук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_003171944/, свободный (дата обращения: 21.01.2024).

2. Ограничения и недостатки преобразования Фурье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ozlib.com/1073141/informatika/okoonnoe_preobrazovanie_fure, свободный (дата обращения: 05.02.2024).

3. Бурмистров В.В. Краткая теория погрешностей. – Коломна: Риза, 2008. – 52 с.

УДК 621.317.361.029.6

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕЛЕВОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

В.А. Фасхудинова, магистрант; Д.Е. Миненко, аспирант

*Научный руководитель Ф.И. Шеерман, к.т.н., каф. КСУП
г. Томск, ТУСУР, vfaskh@gmail.com*

Разработан объемный цилиндрический резонатор, работающий в частотном диапазоне от 8 до 12 ГГц, для измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Реализован прототип устройства и приведены результаты измерения тестовых образцов.

Ключевые слова: целевой цилиндрический резонатор, волноводная мода, диэлектрическая проницаемость, резонансная частота, добротность, потери, коэффициент связи.

СВЧ-подложки используются для создания радиочастотных устройств разной сложности и формы. Как правило, для применения в радиосвязи, радарных системах, системах беспроводной связи и в прочих устройствах подложки должны обладать низкими потерями и стабильным известным значением относительной диэлектрической проницаемости. Параметр, характеризующий потери в диэлектрике, – тангенс угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз напряженность электрического поля внутри диэлектрика меньше, чем напряженность поля в вакууме. Диэлектрическая проницаемость во многом определяет форму и размеры

линий передач, полосковых фильтров, направленных ответвителей и т.д.

Наиболее распространенным типом СВЧ-подложек с низкими потерями является керамика различных видов: алюмооксидная (Al_2O_3), алумонитридная (AlN) и др.

Измерение значений диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) является важным этапом при проектировании СВЧ-устройств и позволяет определить характеристики материалов, а также выбрать наиболее подходящий вариант под требования проекта [1, 2].

Методы измерения диэлектрических параметров в СВЧ-диапазоне можно условно разделить на широкополосные и резонансные. В резонансных методах измерение происходит на одной частоте в высокочастотных резонаторах, что позволяет измерять диэлектрики с низкими значениями $\text{tg}\delta$ ($< 10^{-4}$) [1–3].

Вычисление ϵ_r резонансными методами производится по измеренной резонансной частоте (f_0), а $\text{tg}\delta$ – из значений собственной добротности резонатора с образцом и без образца (Q) [4, 5].

В работе рассмотрено проектирование щелевого цилиндрического резонатора (ЩР) с собственной резонансной частотой $f_0 = 11,5$ ГГц колебания типа H_{011} . Такой тип резонатора выбран из-за того, что, в отличие от других объемных резонаторов, приведенных в ГОСТ-Р 8.623 [6], ЩР имеет более простую конструкцию, представленную на рис. 1. Это цилиндрический волновод, состоящий из двух соосных половинок одинакового размера, в щель между которыми помещается образец диэлектрика. За счет подвижности одной половины резонатора можно регулировать размер зазора между цилиндрами и измерять образцы различной толщины. Петли связи, расположенные в каждой из половинок ЩР, соединяют резонатор с измеряемым устройством. Плавная регулировка глубины погружения петель связи обеспечивает необходимый коэффициент связи резонатора [3].

Такая конструкция позволяет измерять образцы материала как круглой, так и прямоугольной формы. Исследуемые образцы должны иметь гладкую и ровную поверхность, а также достаточные размеры для перекрытия резонансной полости резонатора [6].

Проведем теоретический расчет размеров ЩР. Исходя из того, что для H_{011} $f_0 = 11,5$ ГГц, размеры ЩР для собственного вида колебаний H_{mnp} можно рассчитать из формулы [2]

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\mu \cdot \mu_0 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p \cdot \pi}{L}\right)^2},$$

где a – радиус резонатора; L – длина резонатора; $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ – электрическая постоянная вакуума; $\mu_0 = 1,256637 \times 10^{-6}$ – магнитная постоянная; ε , μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды резонатора; χ_{mt} – корень с номером t производной функции Бесселя порядка n ; p – число полупериодов стоячей волны, укладываемых в длине резонатора L (продольное направление).

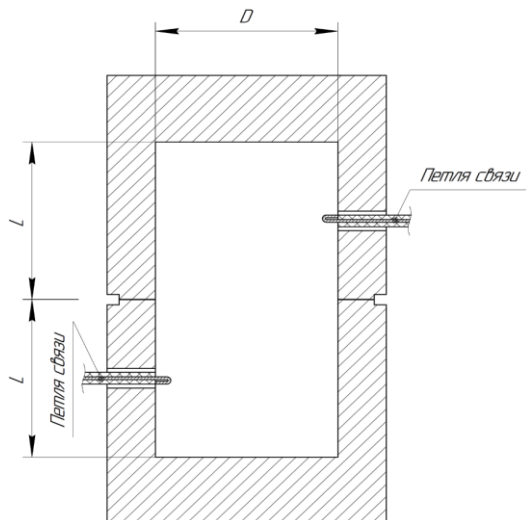


Рис. 1. Вид поперечного сечения разделенного цилиндрического резонатора

Согласно [6], измерения f_0 и Q проводятся на колебании H_{011} , поэтому низшим типом колебания в ЦР должен быть тип H_{111} . Для этого необходимо выполнение условия $L/a > 2,03$. В противном случае низшим колебанием будет тип E_{010} [2].

По приведенной формуле были рассчитаны геометрические размеры ЦР с $f_0 = 11,5$ ГГц колебания H_{011} . Резонатор имеет длину $L = 59,3$ мм и радиус $a = 16,3$ мм. При таких размерах отношение длины к радиусу равно ($L/a = 3,638$), что больше 2,03.

На рис. 2 представлены результаты ЭМ-анализа, согласно которым $f_0 = 11,4913$ ГГц при уровне максимума АЧХ $-43,5$ дБ.

В силу незначительного отклонения расчетных значений от результатов моделирования было принято решение реализовать прототип ЦР по рассчитанным данным и провести серию тестовых измерений. Результаты измерения ЦР без образца представлены в табл. 1. Результаты измерения тестовых образцов различных материалов приведены в табл. 2 и 3.

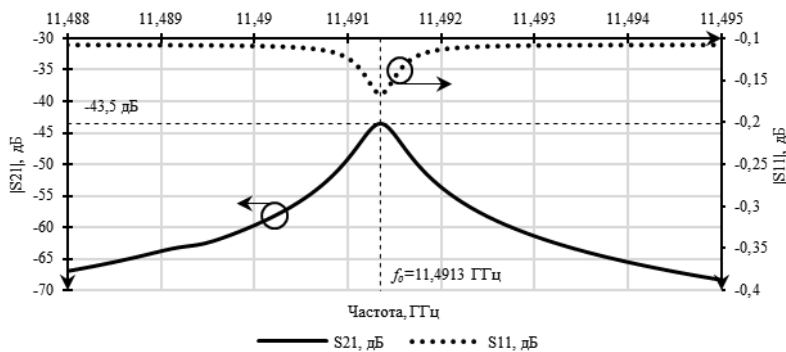


Рис. 2. Графики S -параметров

Таблица 1

Измерение ЦР без образца

f_0 , ГГц	Потери в резонаторе, дБ	Q
11,484378	39,9	24900,25

Таблица 2

Сравнение теоретического и измеренного значения ϵ_r

№	Наименование материала	Толщина ИО (d), мм	ϵ_r	
			Теоретическое значение	Измеренное значение
1	PTFE	1,018	1,9–2,2	2,14
2	PET	0,479	3,1–3,2	3,14
3	Ro4350B	0,749	3,66	3,67
4	Поликор	0,960	9,6–9,8	9,65

Таблица 3

Сравнение теоретического и измеренного значения $\text{tg}\delta$

№	Наименование материала	Толщина ИО (d), мм	$\text{tg}\delta$	
			Теоретическое значение	Измеренное значение
1	PTFE	1,018	0,0002–0,00025	0,00019
2	PET	0,479	0,002–0,008	0,00538
3	Ro4350B	0,749	0,0031–0,0037	0,00367
4	Поликор	0,960	0,00002	0,00003

Исходя из представленных результатов в табл. 1–3, можно сделать вывод, что разработанный цилиндрический ЦР работает корректно, так как измеренные параметры находятся в допустимом диапазоне значений, взятых из технической или справочной документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials // Keysight Technologies 2013–2020. – Published in USA, 2020, August 20. – P. 5989–2589EN.
2. Завьялов А.С. Исследование колебаний в цилиндрическом резонаторе: метод. указания. – Томск: ТГУ, 2000 [Электронный ресурс]. – URL: http://photonics.phys.msu.ru/sobstvennyie_kolebaniya_v_obyemnom_tsilindricheskom_rezonatore_santimetrovogo_diapazona_dlin_voln.pdf (дата обращения: 27.01.2024).
3. Черенков А.Д. Анализ резонансных систем для измерения электрофизических параметров веществ / А.Д. Черенков, Н.П. Кунденко. – Харьков: НТУСХ им. П. Василенко [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-rezonansnyh-sistem-dlya-izmereniya-elektrofizicheskikh-parametrov-veschestv/viewer> (дата обращения: 01.02.2024).
4. Wang X. Fast and Robust Characterization of Dielectric Slabs Using Rectangular Waveguides / X. Wang, S.A. Tretyakov [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2109.00638.pdf>
5. Цилиндрический резонатор. – Ч. IV: учеб.-метод. пособие к спец. лаб. практикуму «Измерения на СВЧ» / С.Л. Брызгалов, А.М. Лерер, Ю.М. Нойкин, В.Н. Шевченко. – Ростов-н/Д, 2008.
6. ГОСТР 8.623– 2015. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот. – М.: Стандартинформ, 2019.

УДК 621.315.611

РАЗРАБОТКА СВЧ-ПЕРЕХОДА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЗОНДА УРОВНЕМЕРА

*А.В. Берестов, аспирант; Е.И. Тренкаль, к.т.н., доцент каф. КУДР
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, streberhighgain@gmail.com*

Применение типового диэлектрика фторопласт-4 в СВЧ-переходе, используемого в сепараторах, затруднительно ввиду экстремальных условий эксплуатации. Разработанный фрагмент СВЧ-перехода в качестве высоконагруженных элементов конструкции имеет вставки из армированного стекловолокном полифениленсульфида. Данное решение позволяет снять механическое напряжение с фторопласта-4 и получить лучшие частотные характеристики.

Ключевые слова: СВЧ-переход, диэлектрическая проницаемость, нефтедобывающая промышленность, сепаратор, давление.

В настоящее время в нефтяной промышленности всё больше используются уровнемеры, основанные на электромагнитных методах измерения. Значительную их часть составляют зондовые импульсные уровнемеры, построенные на принципе рефлектометрии во временной области (TDR). TDR-уровнемер состоит из электронного блока, рас-

положенного за пределами внутреннего объема резервуара или сепаратора, зонда, погружаемого в измеряемую среду, и соединяющего их СВЧ-перехода. СВЧ-переход выполняет функции изолирования измеряемой среды и передачи сигнала с минимальными потерями.

Конструкции традиционных СВЧ-переходов неприменимы для нефтедобывающей промышленности ввиду экстремальных условий измеряемой среды. Среде присущи химическая агрессивность, высокая температура и давление. Проектирование СВЧ-перехода требует учета всех этих факторов.

В рамках данной статьи предложен принцип построения фрагмента СВЧ-перехода для применения в импульсных уровнемерах нефтяной промышленности.

Моделирование СВЧ-перехода с односекционным изолятором. Распространенной практикой проектирования СВЧ-переходов является использование в качестве диэлектрика одного вида материала. Например, в качестве изолятора в СВЧ-переходах широкое распространение получил фторопласт-4 (ПТФЭ). Однако в случаях с упомянутыми ранее экстремальными условиями эксплуатации, как правило, невозможно подобрать один диэлектрик, одновременно удовлетворяющий всем предъявляемым требованиям. Хотя фторопласт-4 и обладает высокой химической стойкостью и широким диапазоном рабочей температуры, его недостатком является неспособность выдерживать высокое давление.

Для проверки данного утверждения произведено моделирование давления внутри сепаратора на стержень измерительного зонда, которое может достигать 88 атм [1]. Структура моделируемого фрагмента перехода приведена на рис. 1, *а*. Результаты моделирования представлены в виде графического изображения полей распределения напряжений на рис. 1, *б*.

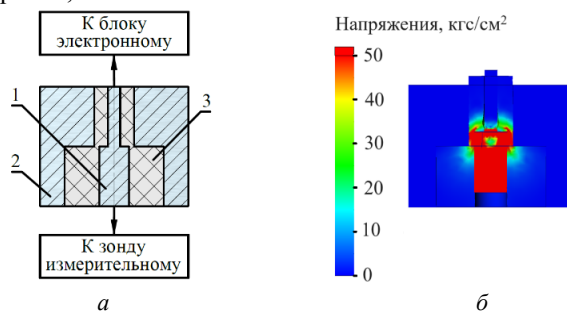


Рис. 1. СВЧ-переход с односекционным изолятором ПТФЭ:

1 – стержень; 2 – экран; 3 – ПТФЭ;

a – структура; *б* – распределение механических напряжений

Согласно данным моделирования, напряжения, возникающие в диэлектрике, значительно превышают предел текучести фторопласта-4, равный $42,4 \text{ кгс/см}^2$ [2], что приводит к разрушению материала.

Моделирование СВЧ-перехода с многосекционным изолятором. Для решения данной проблемы предлагается использование в высоконагруженных участках конструкции диэлектрической вставки из полифениленсульфида с 40% армированием стекловолокна (ПФС СВ-40). Данный материал обладает высокой жесткостью и химической стойкостью, что нашло применение в нефтяной и газовой промышленности [3].

Пример предлагаемой конструкции с использованием вставок из ПФС СВ-40 приведен на рис. 2, а. Результаты моделирования представлены в виде графического изображения полей распределения напряжений на рис. 2, б.

Согласно данным моделирования, напряжения, возникающие в диэлектрической вставке из ПФС СВ-40, не превышают предел текучести, равный $846,4 \text{ кгс/см}^2$ [3]. Так как напряжения имеют характер упругой деформации, то было проведено моделирование смещения элементов конструкции, которое показало, что наибольшая величина деформации диэлектрической вставки не превышает 3 мкм.

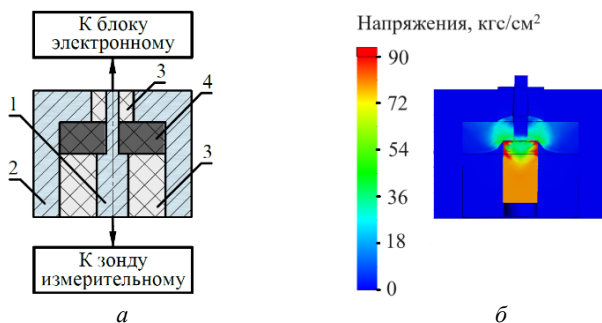


Рис. 2. СВЧ-переход с диэлектрической вставкой ПФС СВ-40: 1 – внутренний проводник; 2 – экран; 3 – ПТФЭ; 4 – ПФС СВ-40; а – структура; б – распределение механических напряжений

Электродинамическое моделирование СВЧ-переходов. На рис. 3 представлен коэффициент передачи S_{21} матрицы рассеяния рассмотренных выше СВЧ-переходов.

Согласно результатам моделирования, кроме механических преимуществ, многосекционный переход имеет лучшие характеристики по коэффициенту передачи S_{21} .

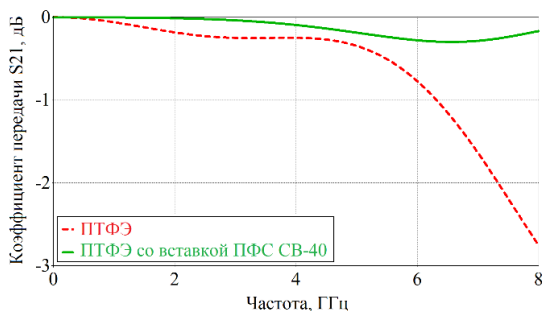


Рис. 3. Параметр S21 матрицы рассеяния

ЛИТЕРАТУРА

1. Сепараторы нефтегазовые [Электронный ресурс]. – URL: <https://pzem.ru/catalog/separatory-i-otstoyniki/separatory/separatory-neftegazovye-tipa-ngs-ngsv/8-8/> (дата обращения: 07.03.2024).
2. Свойства фторопласта-4 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ftoroplast.com.ru/f4-features/> (дата обращения: 07.03.2024).
3. Свойства PPS GF40 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ensinger-online.com/modules/public/datapdf/> (дата обращения: 07.03.2024).

УДК 621.315.611

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ РАССОГЛАСОВАННОСТИ

*Я.А. Петененко, студент; В.С. Поздняков, аспирант;
Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, yana.petenenko@mail.ru*

Определение диэлектрической проницаемости материалов подложек по дифференциально-фазовому методу требует обеспечения условия минимального рассогласования измерительного тракта. Нарушение данного условия возможно при наличии неопределенности параметров измеряемого диэлектрика, что приводит к значительным погрешностям определения диэлектрической проницаемости. Проанализирована и сформирована оптимальная методика расчета диэлектрической проницаемости при наличии рассогласования. Представлены анализ фазовых характеристик рассогласованного тракта; результаты экспериментального исследования, позволяющие определить оптимальные алгоритмы обработки; предложены варианты обработки данных.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, дифференциально-фазовый метод, линейная аппроксимация, производная.

Измерение диэлектрических параметров твердых и жидких материалов является одной из актуальных и сложных задач науки и техники. Для определения диэлектрической проницаемости (ДП) с высокой точностью известны различные методы, такие как волноводные резонаторные, фазовые и др. [1].

Один из известных и относительно простых способов определения ДП основан на использовании измеряемого материала в качестве подложки для полосковых линий передачи. Как правило, такие измерения выполняются с применением дифференциально-фазового метода [2, 3]. В этом случае методика расчета относительной ДП материала требует определения эффективной ДП линии, в расчете которой учитывается разностная фаза $\Delta\varphi$. Разностная фаза может быть получена из коэффициентов S_{21} матрицы рассеяния $[S]$, измеренных для двух линий с идентичными распределенными параметрами, но отличных по длине. Алгоритм расчета с использованием дифференциально-фазового метода представлен в работе [3].

Важным требованием использования данного алгоритма является обеспечение согласования измерительного тракта. В случае когда ДП материала неизвестна, попытка обеспечения волнового сопротивления 50 Ом может быть основана на справочных данных о материале, что не всегда соответствует действительности. Например, в сопроводительных документах материалов производителя Rogers может быть указана ДП, обозначаемая Process [4], отличная от ДП, рекомендуемой для разработки (обозначается Design). Неопределённостью обладает широко распространённый стеклотекстолит FR-4, ДП которого лежит в диапазоне 3,9–4,5 и более. Особой актуальностью обладает задача определения ДП при синтезе новых материалов [5].

Целью данной работы является анализ и формирование оптимальной методики расчета диэлектрической проницаемости материала подложки методом прямого расчета из фазовой характеристики в условиях частичной неопределенности параметров измеряемого диэлектрика.

Моделирование и анализ. Как известно [2], вносимая диэлектрическими материалами гетероструктуры фазовая задержка $\varphi(f)$ напрямую связана с её эффективной ДП $\varepsilon_{\text{эфф}}$:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = (\varphi(f)c / 2\pi fl)^2, \quad (1)$$

где c – скорость распространения ЭМ-волны в вакууме, м/с; f – частота, Гц; l – длина тракта, м.

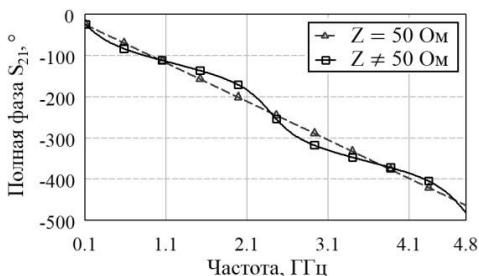
Выражение (1) справедливо и даёт точный результат для случаев, когда выполняется условие согласования измеряемого тракта. В слу-

чае когда волновое сопротивление Z измеряемого отрезка не равно волновому сопротивлению Z_0 тракта, фазовая характеристика искажается (рис. 1) и расчет по выражению (1) даёт значительную погрешность определения $\varepsilon_{\text{эфф}}$.

При наличии рассогласования линейный тренд фазы $\varphi_{\text{л}}(f)$ сохраняется, при этом по причине переотражений в тракте добавляется составляющая с периодическим характером $\varphi_{\text{п}}(f)$ (см. рис. 1), что позволяет определить выражение для описания фазовой характеристики несогласованной линии: $\varphi(f) = \varphi_{\text{л}}(f) + \varphi_{\text{п}}(f)$.

Амплитуда колебаний $\varphi_{\text{п}}(f)$ зависит от степени рассогласования, а периодичность – от длины рассогласованного участка. Составляющая $\varphi_{\text{л}}(f)$ описывается стандартным выражением линейной функции: $\varphi_{\text{л}}(f) = a \cdot f + b$. Для определения эффективной ДП (при отсутствии дисперсии) рассогласованной линии достаточно определить коэффициенты a и b линейной функции, при этом $b \rightarrow 0$.

Рис. 1. Полная фаза S_{21} согласованной и рассогласованной линии



Расчет a может выполняться:

1) применением линейных аппроксимирующих функций по методу наименьших квадратов (МНК);

2) через производную $\varphi'(f)$ по свойству алгебраической суммы производных: $\varphi'(f) = \varphi_{\text{л}}'(f) + \varphi_{\text{п}}'(f) = a + \varphi_{\text{п}}'(f)$. Отдельной задачей является анализ и выбор оптимального алгоритма определения тренда функции $\varphi'(f)$. Варианты: $0,5 \cdot (\max(\varphi'(f)) - \min(\varphi'(f)))$; линейная аппроксимация $\varphi'(f)$ по МНК; функция арифметического среднего $\overline{\varphi'(f)}$ и др.

В данной работе для выбора оптимальной функции исследовались две МПЛ, в основе которых использовались диэлектрики Rogers 4003С ($\varepsilon = 3,55$, $Z = 67 \text{ Ом}$) и 6010LM ($\varepsilon = 10,2$, $Z = 45 \text{ Ом}$). Выполнялось восстановление исходной относительной диэлектрической проницаемости материалов. В качестве исходных фазовых характеристик использовались данные, полученные экспериментально и электродинамическим моделированием.

В результате анализа наилучший результат был получен для алгоритма функции арифметического среднего, погрешность восстановления ДП составила не более 5%. При этом, согласно проведенному анализу согласованных линий с использованием регрессионного анализа на основе электродинамической модели, погрешность используемого аналитического выражения расчета относительной ДП из эффективной ДП составляет около 3%. Таким образом, значение 5%, вероятно, может быть уменьшено путем использования более точных аналитических выражений или моделей расчета МПЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Measurement and Materials Characterization / L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo et al. // Microwave Electronics. – 2006. – P. 546.
2. Кунрод Д. Определение параметров материалов печатных плат в миллиметровом диапазоне // СВЧ-электроника. – 2019. – № 3. – С. 46–50.
3. Петененко Я.А. Влияние инструментальной погрешности ВАЦ на точность расчета диэлектрической проницаемости фазовыми методами / Я.А. Петененко, Е.И. Тренкаль, В.С. Поздняков // Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2023. – С. 124–127.
4. Datasheet – RT/duroid 6006 and 6010.2LM Laminates [Электронный ресурс]: сайт rogerscorp.com. – URL: <https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/rt-duroid-laminates/rt-duroid-6006-and-6010-2lm-laminates> (дата обращения: 05.03.2024).
5. Expanding the Horizon of Additive Printing Technologies Application in the Technique of Coupled Strip Lines with Heterogeneous Dielectric Filling / A.G. Loschilov, T.T. Thanh, G.A. Malyutin et al. // IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (Edm). – 2022.

УДК 621.3.087.45

КОНЦЕПЦИЯ ПОРТАТИВНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

Р.С. Саразов, А.А. Коробков, студенты каф. ТПЭДЛА

*Научный руководитель С.Б. Маликов, доцент каф. ТПЭДЛА, к.т.н.
г. Москва, МАИ, roman-03-31@mail.ru*

Разработана концепция устройства, способного облегчить решение широкого круга радиотехнических задач, связанных с наведением антенн на радиосигнал.

Ключевые слова: автоматизация измерений, наведение, юстировка антенн, электромагнитная обстановка, исследование радиосигналов, поворотное устройство.

В современном мире применение беспроводных каналов связи приобрело широкое распространение [1]. С каждым годом возрастает количество используемых радиоэлектронных средств. Усложнение схем и возрастание общего количества активных радиоэлектронных устройств привели к возрастанию как числа источников, так и уровня излучаемых в окружающее пространство электромагнитных помех [2], вследствие чего эффективное использование радиочастотного спектра и создание условий для нормального функционирования всевозможной электронной техники становится актуальной и весьма сложной задачей [3]. Поэтому при разработке и эксплуатации современных электронных устройств требуется учитывать условия их эксплуатации, включая электромагнитную обстановку, в которой им надлежит работать.

При вводе в эксплуатацию различных радиоэлектронных систем связи (в том числе устройств дистанционного управления, телеметрии и проч.) требуется первичная настройка, заключающаяся в необходимости выставить определенное взаимное положение антенн в пространстве. Так, например, для работы узконаправленной антенны сотовой связи необходимо навести ее на базовую станцию с достаточно высокой точностью [4]. Существуют специальные программы для вычисления углов поворота спутниковых антенн [5]. При настройке радиомостов при помощи взаимного расположения (юстировки) антенн требуется точно задать направление распространения сигнала [6]. В реальных условиях на результат влияет множество факторов, такие как различные препятствия (здания, деревья), рельеф местности и др.

Общий принцип поиска сигнала при наведении антенны показан на рис. 1.

Как правило, оператор вручную наводит антенну в предполагаемый сектор. Затем, ориентируясь на показания измерительного оборудования (внешний анализатор спектра или же непосредственно программное обеспечение радиотехнической системы), выставляет необходимое положение в пространстве, соответствующее наилучшему уровню приема сигнала, т.е. его максимальной амплитуде (рис. 2).

Такой способ сопряжен с рядом трудностей, в первую очередь, связанных с точностью и повторяемостью результата, что особенно проявляется при работах с узконаправленными антеннами.

На рис. 3 представлено предлагаемое техническое решение – портативная измерительная установка. Принципиальное отличие от иных подобных систем – наличие моторизированного опорно-поворотного устройства (подвеса) антенны, которое имеет возмож-

ность автоматического изменения положения в трех координатах – по углу азимута, углу места и углу поляризации антенны. Оператору достаточно задать предварительные настройки, после чего устройство само выделит сигнал и задаст положение антенны на его максимальную амплитуду [7], при необходимости рассчитав все необходимые углы и иные параметры.

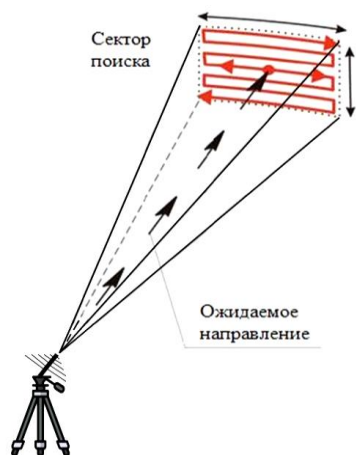


Рис. 1. Процесс юстировки антенны

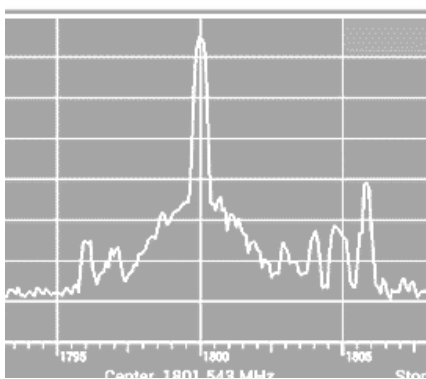


Рис. 2. Электромагнитная обстановка и уровни радиосигналов



Рис. 3. Общий вид установки

Такое наведение антенны повышает точность измерений, их повторяемость, снижает трудо-временные затраты.

Помимо юстировки антенн и исследования радиосигналов, описываемое устройство может быть востребовано при оценке электромагнитной обстановки, радиолюбительских экспериментах и иных задачах радиотехники.

На момент написания данной статьи ведется разработка и изготовление [8] описанной измерительной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алламуратова З.Ж. Сравнительный анализ существующих моделей распределения уровней электромагнитного поля в условиях города // Science and Innovation. – 2023. – № 3. – С. 678–679.
2. Ромашенко М.А. Основы внутриаппаратурной электромагнитной совместимости: учеб. пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2020. – 125 с.
3. ГОСТ 23872–79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Номенклатура параметров и классификация технических характеристик. – Введ. 1981.01.01– М.: Изд-во стандартов, 1988. – 19 с.
4. Попов В.И. Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития / В.И. Попов, В.А. Скуднов, А.С. Васильев // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 11-3 (20). – С. 138–141.
5. Настройка спутниковой антенны. Расчёт угла поворота спутниковой антенны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.al-soft.com/saa/satinfo-ru.shtml>, свободный (дата обращения: 05.11.2023).
6. Сборник инструкций и рекомендаций по настройке и эксплуатации отдельных устройств радиорелейных систем. – Утв. 1981.11.10. – М.: Радио и связь, 1983. – 40 с.
7. Особенности применения полноповоротных антенных систем в наземных комплексах радиомониторинга / С.В. Кожевников, С.Д. Кирилков, С.С. Тимофеев и др. // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 21–32.
8. Маликов С.Б. Оценка технических рисков организации параллельного выполнения работ опытного производства / С.Б. Маликов, В.Н. Юрин // Металлообработка. – 2011. – № 6 (66). – С. 33–37.

УДК 621.319.53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЯ СТРОБ-ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ С ЩЕЛЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ

И.В. Крузе, студент ПИШ;

Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, kruze01@mail.ru

Представлены результаты по моделированию и исследованию структуры формирователя стробоскопических импульсов на основе щелевого резонатора. Было исследовано влияние переднего и заднего фронтов входного сигнала, а также длины и ширины резонатора, на выходной сигнал формирователя стробоскопических импульсов. Представлены результаты электродинамического моделирования данной структуры. Определены требования к входному сигналу, выбрана оптимальная топология резонатора в рамках текущего проекта.

Ключевые слова: формирователь, строб-импульс, щелевой резонатор, стробоскопический преобразователь.

В настоящее время процессы в устройствах различного назначения могут иметь длительности порядка доли наносекунд, из чего следует, что спектр сигналов, обусловленный данными процессами, достигает десятков гигагерц. Для того чтобы производить исследование и контроль подобных приборов, необходимо устройство, которое будет обладать широкой полосой пропускания. Примером подобных приборов являются стробоскопические осциллографы, частотомеры, анализаторы цепей, рефлектометры, содержащие в качестве входного устройства стробоскопический приёмник, который осуществляет преобразование частоты входного сигнала и выступает в роли устройства выборки и хранения.

В рамках проекта Передовой инженерной школы (ПИШ), посвящённого разработке гибридной интегральной схемы, которая фактически является рефлектометром, необходимо реализовать блок стробоскопического приёмника. Основополагающей частью этого блока является формирователь стробоскопических импульсов.

Из теории стробоскопического преобразования частоты известно, что их широкополосность определяется длительностью, амплитудой и формой строб-импульсов. Расчет полосы ΔF_{Π} стробоскопического преобразователя (в ГГц) определяется соотношением [1]

$$\Delta F_{\Pi} = 450/\tau_{и}, \quad (1)$$

где $\tau_{и}$ – длительность стробоскопического импульса.

Из этого следует, что для реализации широкой полосы пропускания необходимо обеспечить минимально возможную длительность стробоскопических импульсов.

Для формирования стробоскопических импульсов была выбрана структура на основе щелевого резонатора. Топология анализируемого формирователя стробоскопических импульсов представлена на рис. 1.

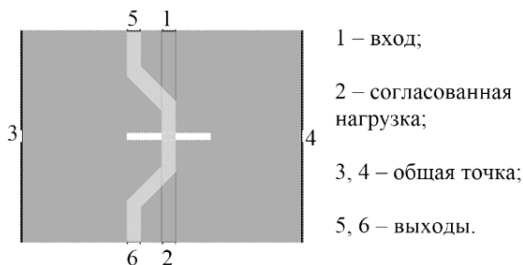


Рис. 1. Топология формирователя строб-импульсов на щелевом резонаторе

Параметры сформированных строб-импульсов (амплитуда и длительность) зависят от амплитуды и длительности входного перепада напряжения и от длины l и ширины w резонатора. При бесконечно

малом входном перепаде напряжения гетеродина длительность будет определяться задержкой τ_3 в резонаторе [1]

$$\tau_3 = l/v, \quad (2)$$

где v – скорость распространения волны.

При конечной величине длительности фронта сигнала длительность сформированного в резонаторе импульса будет определяться суммарной величиной задержки и длительности нарастания фронта входного сигнала.

Выполнено электродинамическое моделирование структуры, представленной на рис. 1. Предметом исследований являлись влияние длительности фронта сигнала гетеродина, длины l и ширины w резонатора на длительность и форму строб-импульсов.

Полученные осциллограммы представлены на рис. 2.

Для оценки влияния параметров резонатора использовался импульс с длительностью нарастания фронтов 0,1 нс.

На основе проведенных экспериментов было выявлено, что с ростом длительности нарастания фронтов входного сигнала амплитуда стробоскопических импульсов уменьшается, а их длительность увеличивается пропорционально длительности нарастания.

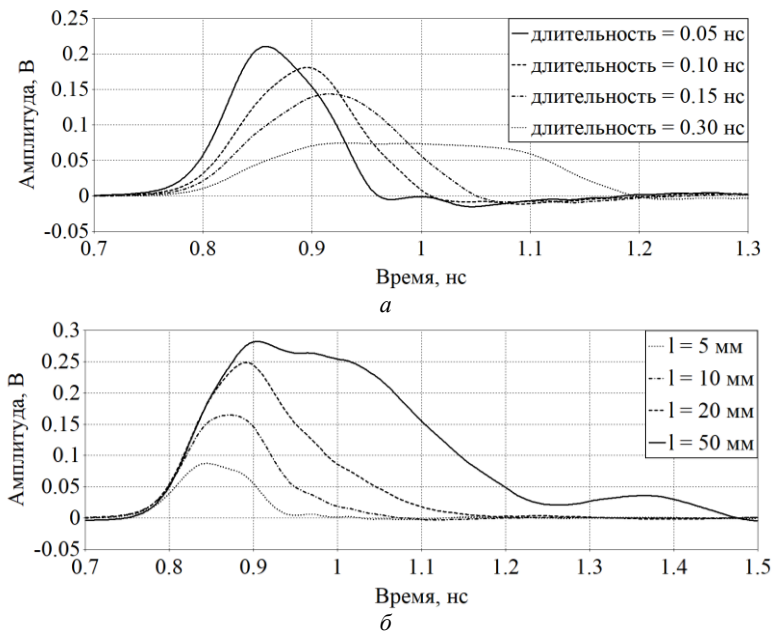


Рис. 2 (начало)

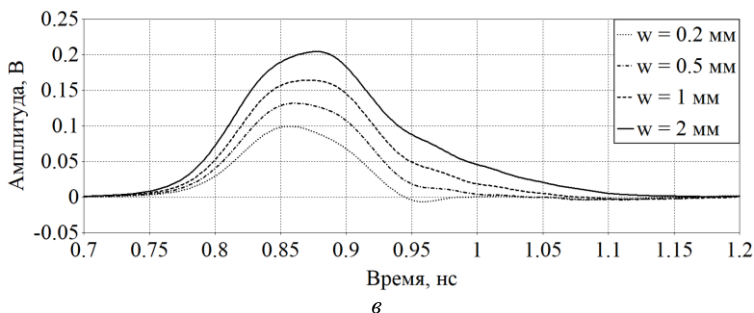


Рис. 2 (окончание). Выходные сигналы строб формирователя в зависимости:
a – от длительности нарастания фронта входного сигнала;
б – от длины *l* резонатора; *в* – от ширины *w* резонатора

На текущий момент в проектируемом устройстве длительность фронтов импульса определяется схемой синхронизации. Таким образом, для достижения лучших параметров возникает необходимость уменьшения длительности фронта, что может быть достигнуто обострением фронтов. Касательно длины и ширины резонатора, оптимальные соотношения должны быть достигнуты в зависимости от требуемых габаритов конечного изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шитов А.М. Широкополосные преобразователи частоты для радиоизмерительных приборов СВЧ: дис. ... д-ра техн. наук. – Н. Новгород, 2004. – 250 с.

УДК 621.3.049.75

РАЗРАБОТКА ТЕСТОВОЙ ПЛАТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИНТЕРНОЙ ПЕЧАТИ ГИС

А.С. Меркулова, Н.С. Нефедов, магистранты ПИШ

*Научный руководитель С.А. Артищев, зав. лаб. «Аддитив», к.т.н.
 г. Томск, ТУСУР, merkulovaalexan@yandex.ru*

Принтерная технология изготовления гибридных интегральных схем (ГИС) может быть применена при прототипировании или в мелкосерийном производстве. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению технологических возможностей принтерной печати.

Ключевые слова: принтер печатных плат, принтерная технология, тестовая плата, гибридная интегральная схема.

Принтерная (цифровая) технология изготовления толсто пленочных гибридных интегральных схем (ГИС) предполагает поочередное нанесение функциональных материалов на подложку при помощи специального устройства дозирования [1]. Применение данной технологии печати ГИС позволяет снизить временные и финансовые затраты на прототипирование новых изделий. Принтерная технология может быть использована при мелкосерийном производстве толсто пленочных ГИС, например, в комической отрасли, где широкое применение находит технология трафаретной печати. Однако, чтобы осуществить переход от трафаретной технологии изготовления ГИС к цифровой необходимо определить технологические ограничения и возможности принтерной печати. Толсто пленочная технология, в зависимости от материала, позволяет обеспечить минимальную ширину проводника от 100 мкм с зазором между двумя дорожками от 100 мкм [2]. Максимальная точность изготовления находится в пределах ± 30 мкм.

Цель работы – исследование параметров печатных элементов тестовой платы, изготовленной по технологии принтерной печати.

Методика проведения экспериментальных исследований предполагала изготовление тестовой платы с набором различных печатных элементов для определения следующих технологических параметров:

- повторяемость (точность) печати элемента (проводника) на примере линий длиной 5 мм и шириной 0,2 мм (рис. 1, а, ряд 1);
- минимальный зазор между элементами на примере линий с зазором, изменяющимся в диапазоне от 0,1 до 2,15 мм и шагом 0,05 мм (см. рис. 1, а, ряд 2) ;
- дискретность изменения ширины элемента на примере линий с шириной, изменяющейся в диапазоне от 0,1 до 2 мм и шагом 0,05 мм (см. рис. 1, а, ряд 3).

Для определения технологических ограничений принтерной технологии печати была проведена печать проводящего рисунка при помощи принтера Voltera V-one. Печать осуществлялась пастой ПП-17 производства ООО «Элма-пасты». Результат печати тестовой платы представлен на рис. 1, б.

Данные, полученные в результате анализа параметров напечатанных линий, сведены в таблицу.

Основываясь на приведённых в таблице данных, можно сделать вывод о том, что принтерная технология печати способна обеспечить минимальную ширину линии 0,19 мм с точностью $\pm 36\%$. Проводя аналогичный анализ для второго и третьего типа линий (анализ зазора и ширины элементов), можно сделать следующий вывод: минималь-

ное расстояние между элементами – $0,53 \pm 9\%$, минимальная ширина линии – $0,24 \pm 13,21\%$.

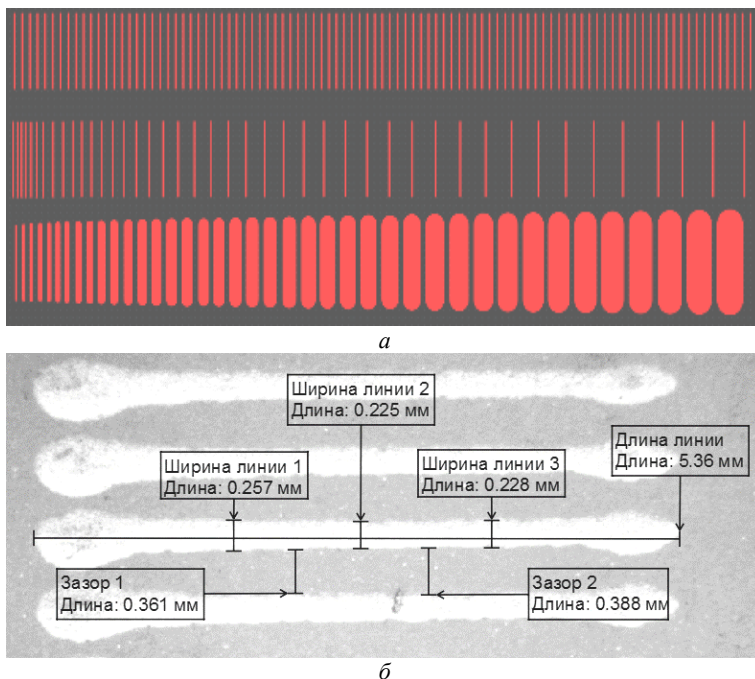


Рис. 1. Топология тестовой платы (а) и изготовленный образец (б)

Анализ результата печати линий первого типа

Заданное значение ширины линии, мм	Минимальное значение ширины линии, мм	Максимальное значение ширины линии, мм	Среднее значение ширины линии, мм	Абсолютная погрешность, мм	Относительная погрешность, %
0,2	0,19	0,34	0,27	0,07	36

Таким образом, осуществляя переход от классической технологии изготовления ГИС – трафаретной печати к принтерной, необходимо учитывать возникшую разницу технологических возможностей. Несмотря на высокую разницу минимальных возможностей трафаретной печати, цифровая технология активно развивается и уже сейчас используется для изготовления: прототипов ГИС, ГИС, применяемых в космической отрасли, и ГИС в мелкосерийном производстве. В дальнейшем планируется продолжение изучения технологических

возможностей принтерной технологии печати, изготовление новых образцов для проведения исследований.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FEWM-2022-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2801761 РФ, МПК H05K 13/00. Способ и устройство изготовления печатной платы / Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, А.Е. Здрок, А.Г. Лощиллов (РФ). – № 2 022 130 784; заявл. 26.11.2022; опубл. 16.08.2023. Бюл. № 23. – 3 с.

2. Особенности технологии прецизионной трафаретной печати в производстве многослойных высокоплотных LTCC-плат / Ю.А. Рудак, Я.М. Перцель // Техника радиосвязи. – 2013. – № 1(19). – С. 80–87.

3. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления многослойных печатных плат / Н.С. Труфанова, Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, А.Г. Лощиллов // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 37–44.

УДК 621.3.084

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ПАРНЫХ ДНЗ-ДИОДАХ

*Е.А. Самардакевич, студент ПИШ; В.С. Поздняков, аспирант
каф. КУДР; Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.
г. Томск, TVCYP, egor.a.samardakevich@tusur.ru*

Представлены результаты моделирования и макетирования генератора импульсов сверхкороткой длительности на основе схемы с парными диодами с накоплением заряда. В результате моделирования и экспериментального исследования достигнута амплитуда импульса 1,5 В, при этом длительность составила 600 пс.

Ключевые слова: генератор, импульс, диод с накоплением заряда, ДНЗ.

В настоящее время генераторы сверхкоротких импульсных сигналов достаточно широко применяются в составе множества систем в различных отраслях, таких как сельское хозяйство (уровнемеры жидкостей и сыпучих материалов, анализаторы почвы), медицина, строительство (контроль качества бетонных сооружений), нефтяная промышленность (уровнемеры нефти в резервуарах, контроль состояния трубопроводов), авиастроение, космические аппараты (проверка кабельных линий) и др.

Достижение наилучших характеристик таких систем, как правило, напрямую связано с понижением длительности и повышением амплитуды импульсных сигналов. В настоящее время известно множество работ [1–5] с достигнутой длительностью импульсов несколько сотен пикосекунд при амплитуде от 5 до 31,3 В. Для формирования таких сигналов широкое распространение получили схемы на СВЧ-диодах, среди которых значимую группу составляют схемы на диодах с накоплением заряда. Принцип работы основан на свойстве резкого восстановления обратного сопротивления ДНЗ-диода при переключении в закрытое состояние. Известны схемы, которые позволяют обеспечить амплитуду импульсов до 30 В и длительность от 35 пс [6].

В рамках проекта по разработке импульсного рефлектометра требуется спроектировать генератор импульсных сигналов с амплитудой не менее 1 В, длительностью по уровню 50% не более 266 пс и частотой следования от 100 кГц до 50 МГц. Входной сигнал определяется схемой синхронизации, которая формирует меандр с амплитудой 3,3 В и длительностью фронтов порядка 5 нс.

За основу была взята и промоделирована схема (рис. 1), предложенная в работе [7]. В качестве VD1 и VD4 был использован диод HMPS-2860; для VD2, VD3 – диод 2Д524А.

Принцип работы. Диод VD1 необходим для блокировки возможных отрицательных входных напряжений. На катоды диодов VD2, VD3 через токоограничивающий резистор R2 приходит постоянное отрицательное напряжение смещения. Резистор R1, равный 50 Ом, обеспечивает согласование входной цепи. Резистором R3 возможна регулировка длительности импульса. Диод VD4 необходим для фильтрации отрицательного напряжения на выходе. Подробное описание принципа работы генератора дано в [7]. Принципиальная схема генератора импульсов на основе пары ДНЗ указана на рис. 1.

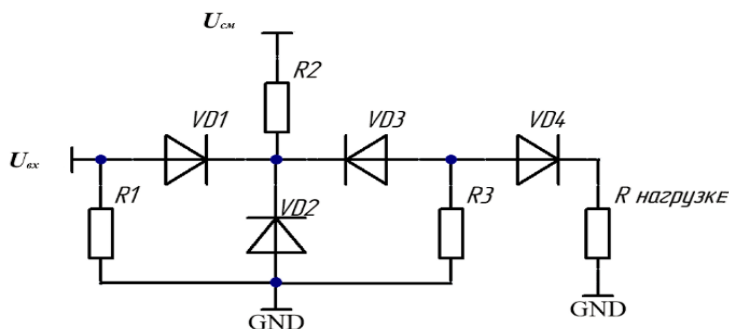


Рис. 1. Принципиальная схема генератора импульсов на основе пары ДНЗ [7]

Моделирование. В результате моделирования (при $R3 = 100 \text{ Ом}$) была достигнута амплитуда 1,5 В, длительность 120 пс, частота следования 24 МГц (рис. 2).

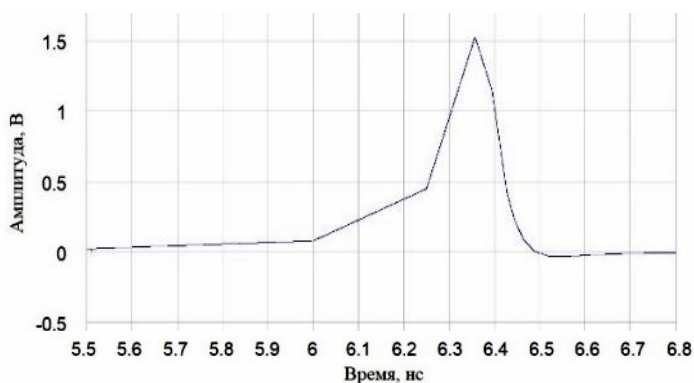


Рис. 2. Импульс, полученный в ходе моделирования схемы генератора импульсов на основе пары ДНЗ при $R3 = 100 \text{ Ом}$

Макетирование. После моделирования был создан макет печатного узла генератора (рис. 3). Для тестирования был использован сигнал амплитудой 3 В, длительностью 20 нс и фронтами нарастания и спада 1 нс. В результате был получен импульс (рис. 4) амплитудой 1,6 В и длительностью 650 пс.

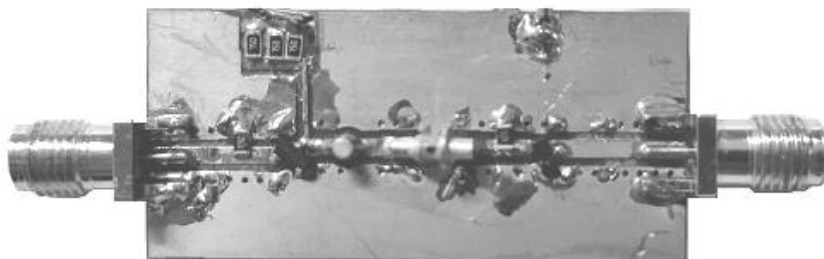


Рис. 3. Макет генератора импульсов на основе пары ДНЗ

Импульсные сигналы, полученные в результате моделирования и макетирования, имеют схожую амплитуду, но значительно отличаются по длительности, что может быть обусловлено неточностью задания моделей и паразитными параметрами макета.

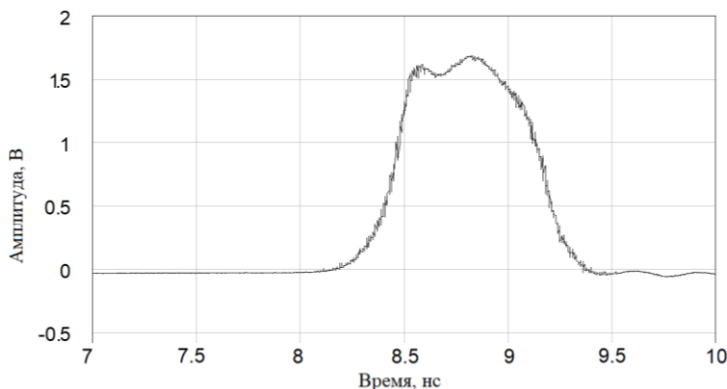


Рис. 4. Форма импульса, полученного в ходе тестирования макета генератора импульсов на основе пары ДНЗ при $R3 = 100 \text{ Ом}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальная установка для возбуждения полупроводников и диэлектриков пикосекундными импульсами электронного пучка и электрического поля / А.С. Насибов, К.В. Бережной, П.В. Шапкин и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 1. – С. 75–84.
2. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / А.М. Бобрешов, Ю.И. Китаев, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2011. – Т. 14, № 3. – С. 103–108.
3. Гришин С.В. Способ формирования ультракоротких импульсов в генераторных схемах с трехволновым параметрическим взаимодействием / С.В. Гришин, А.С. Бир, Д.В. Романенко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 307–308.
4. Использование нелинейных линий передачи для сжатия пикосекундных импульсных сигналов / А.М. Бобрешов, А.С. Жабин, А.Д. Рязанцев и др. // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова, Воронеж, 28–30 сентября 2021 г. – Воронеж. гос. ун-т, 2021. – Т. 4. – С. 150–157.
5. Формирование сверхкоротких импульсов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона / А.М. Бобрешов, А.Е. Елфимов, В.А. Степкин, Г.К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 46–52. DOI: 10.18469/1810-3189.2021.24.4.46-52.
6. Pulse and Waveform Generation with Step Recovery Diodes // Hewlett-Packard Journal. Application Note 918 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hpmemoryproject.org/an/pdf/an_918.pdf (дата обращения: 01.10.2023).
7. Lianfeng Zou. A Simple Picosecond Pulse Generator Based on a Pair of Step Recovery Diodes / Lianfeng Zou, Shulabh Gupta, Christophe Caloz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cooking-guide.com/step-recovery-diode-pulse-generator/>

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАТОРОВ КОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ СЕТИ SPACEWIRE

С.Ю. Василенко, студент каф. КУДР

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

*Проект ГПО КУДР-2003. Разработка средств автоматизации
сбора и передачи данных*

г. Томск, ТУСУР, vasilenko.s.230-4@e.tusur.ru

Представлены разработанные цифровые модели для анализа и тестирования сетей SpaceWire, имитирующих прием и передачу данных в сети SpaceWire.

Ключевые слова: программное обеспечение, SpaceWire, тестирование, цифровая модель.

В современном мире, где технологии развиваются с невероятной скоростью, возникает потребность в инновационных подходах к разработке и анализу технологии связи и автоматизации на космических аппаратах. Одной из таких передовых систем является сеть SpaceWire (SpW), только недавно начавшая свое развитие в российской аэрокосмической отрасли и предназначенная для управления передачей данных на борту космических аппаратов [1].

Перед проектированием и внедрением критически важных систем требуется их тщательное тестирование на специализированных стендах. При таких испытаниях для эффективного анализа данных, передаваемых по сети SpW, требуется наличие большого количества сетевых устройств, оснащенных аппаратными блоками протокола транспортного уровня RMAP (протокол удаленного действия к памяти) [2]. Однако использование физических реализаций этих устройств чревато высокими затратами и сложностями, связанными с потенциальными ошибками в данных из-за сбоев в работе оборудования.

Вследствие этого было предложено использовать цифровые модели устройств в сети SpW в качестве альтернативы реальным устройствам.

Этот подход не только экономически выгоден, снижает затраты на приобретение и обслуживание физического оборудования, но и предоставляет гибкость в настройке и масштабировании будущих сценариев на тестовом стенде. Более того, цифровые модели устройств обладают большей контролируемостью и повторяемостью испытательных сценариев, позволяя моделировать сложные и непредсказуемые ситуации без риска для реального оборудования.

Структура цифровой модели. Разработка цифровой модели, называемой далее имитатором конечного устройства (ИКУ), началась

с создания его структурной схемы, основывающейся на ключевых протоколах передачи данных, включающих RMAP и ModBus, обеспечивающих реализацию потока данных в реальном времени, который затем передается по сети SpW. Таким образом, для достижения максимальной реалистичности и функциональности ИКУ должен иметь:

1) собственную таблицу регистров протокола RMAP с различными типами доступа (чтение, запись, чтение/запись);

2) собственный поток данных, генерируемый в реальном времени и организованный протоколом ModBus, схожим по структуре с RMAP;

3) способность к взаимодействию с устройствами на основе маршрутизации протокола SpW.

Функционал ИКУ. ИКУ функционирует как отдельное приложение, которое активируется путем создания через другое приложение – «Проектировщик ИКУ».

В связи с необходимостью имитации работы устройства на ПК был выбран протокол Modbus TCP для организации взаимодействия между таблицей RMAP и Modbus-клиентом, генерирующего данные. Каждый ИКУ функционирует независимо на основе выделенного Modbus-сервера и связан с соответствующим ему Modbus-клиентом. Пример приложения ИКУ в комплексе с Modbus-клиентом представлен на рис. 1.

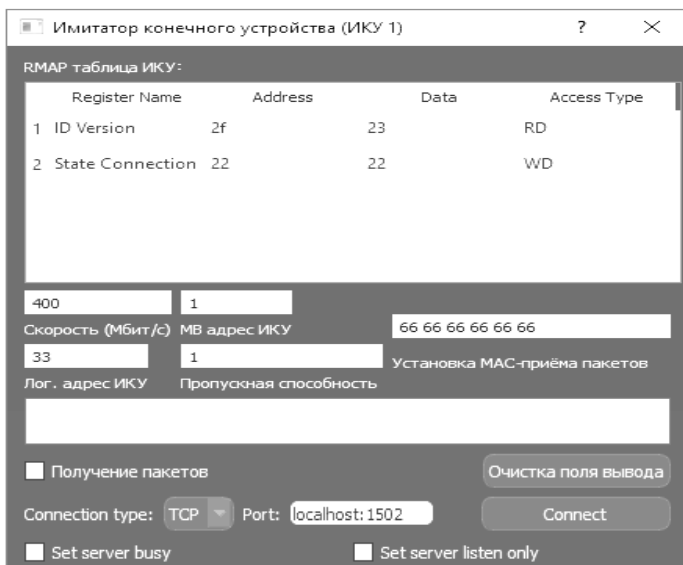


Рис. 1 (начало)

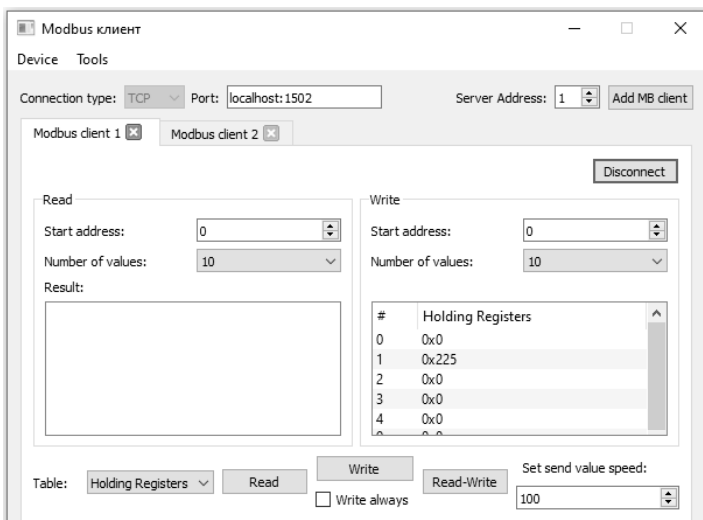


Рис. 1 (окончание). Приложение ИКУ в комплексе с Modbus-клиентом

Реализация проектировщика ИКУ. Для обеспечения возможности создания нескольких ИКУ со схожими характеристиками было разработано специализированное ПО (рис. 2) – «Проектировщик ИКУ». Данное ПО позволяет настраивать параметры ИКУ, включая формат таблицы RMAP, логический и MAC-адреса в сети SpW, а также номер выделенного под ИКУ Modbus сервера, обеспечивая их согласованность с хост-устройством в сети SpW.

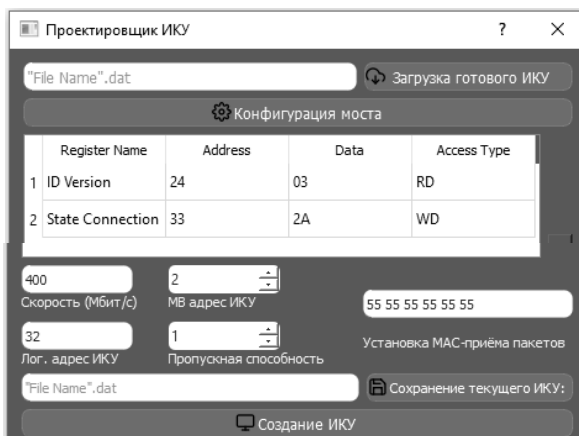


Рис. 2. Приложение проектировщика ИКУ

Заключение. В рамках проведенной работы были успешно разработаны и реализованы концепция и программное обеспечение для имитатора конечного устройства.

Основываясь на использовании Modbus TCP для организации потока данных между Modbus-клиентом и ИКУ, разработанное ПО позволяет имитировать работу реального устройства. Генерируемые таким образом данные могут быть переданы по сети SpW.

В дальнейшем ПО планировалось стать частью лабораторного комплекса для тестирования и анализа данных, проходящих через устройства сети SpW. Предвидится использование 4-8 ИКУ с возможным расширением количества устройств после проведения соответствующей оценки производительности ПО и используемого оборудования.

В будущем также планируется разработка ряда тестов для проверки взаимодействия устройств ИКУ через маршрутизацию сети SpW, добавление функционала для обнаружения ошибок и учета задержек в передаче данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределительных комплексов / Ю.Е. Шейнин, Т.В. Солохина, Я.Я. Петричкович // Электроника: наука, технология, бизнес (Москва). – 2006. – № 5. – С. 64–75.
2. Remote memory access protocol (normative). – URL: <http://spacewire.esa.int/content/Standard/documents/SpaceWireRMAP/ProtocolDraftF4thDec2006.pdf> (дата обращения: 20.04.2022).
3. ECSS-E-ST-50-12C Rev.1. Space engineering. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks // ECSS Secretariat. ESA-ESTEC Requirements & Standards. Division Noordwijk, The Netherlands.
4. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ №2022684845. TALGAT 2011 / С.Ю. Василенко, А.К. Пашенко, К.А. Сердюков и др. – Заявка № 2022683436. Дата поступления 2 декабря 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19 декабря 2022 г.
5. MODBUS Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b. – URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf (дата обращения: 20.04.2022).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕТРАНСЛЯТОРА СПУТНИКА СВЯЗИ

С.С. Журавлев, Н.О. Кузьмин,

В.А. Трубченинов, А.А. Киселева, магистранты

Научный руководитель В.И. Тисленко, проф. каф. РТС, д.т.н.

Проект КАФ-ПИИШ. Созвездие

г. Томск, ТУСУР, sergei.s.zhuravlev@tusur.ru

Рассмотрена модель полезной нагрузки (ретранслятора) космического аппарата связи. Модель предназначена для разработки алгоритмов измерения электрических характеристик ретранслятора при помощи сигналов с цифровой модуляцией. Оценки параметров должны формироваться в результате обработки квадратур сигнала на выходе устройства, полученных при выполнении измерений амплитуды вектора ошибки (EVM-тест). Длительность основных испытаний полезной нагрузки можно существенно сократить, а процедуру испытаний оптимизировать, если в результате анализа сигнала будут диагностированы основные искажающие факторы.

Ключевые слова: система связи, ретранслятор, цифровая модуляция, измерение, моделирование.

Бортовые ретрансляционные комплексы современных спутниковых систем связи выполняют прием сигналов в трех диапазонах частот: 6, 14 и 30 ГГц [1]. Передача сигналов потребителям осуществляется после преобразования частоты в диапазоны 4, 11 и 20 ГГц соответственно. Этим определяются диапазоны рабочих частот источников и приемников сигналов в измерительной системе. Интегральными характеристиками искажений сигналов модуляции являются: амплитуда вектора ошибки (EVM – Error Vector Magnitude), коэффициент мощности в соседнем канале (ACPR – Adjacent Channel Power Ratio) и коэффициент мощности шума (NPR – Noise Power Ratio). Традиционно эти измерения выполняются при помощи генератора и анализатора сигналов. Однако базовые испытания ретрансляторов систем связи и передачи информации предполагают определение другого набора параметров: модуль коэффициента преобразования (КП) на центральной частоте; неравномерность модуля КП в диапазоне частот; неравномерность группового времени запаздывания (ГВЗ) в диапазоне частот; ширина полосы частотного канала; коэффициент отражения входа и выхода; коэффициент шума; уровень спектральной плотности мощности фазового шума, а также ряд других, в том числе характеристик нелинейных искажений. Эти измерения можно выполнить, используя векторный анализатор цепей и другие приборы.

Прежде чем рассмотреть математическую модель ретранслятора, определим облик измерительной системы. В качестве источника сигнала с цифровой модуляцией следует использовать векторный генератор сигналов. Регистрацию сигналов можно выполнить при помощи цифрового осциллографа или анализатора спектра. Поскольку частоты сигналов на входе и выходе ретранслятора различны, то это необходимо учесть при настройке аппаратуры. Главным преимуществом использования осциллографа в качестве приемника является возможность использования нескольких каналов приема. В частности, помимо основного измерительного канала, при помощи направленных ответвителей можно организовать опорный канал, а также каналы приема отраженных сигналов.

Схема измерений в таком случае практически совпадает со схемой построения векторного анализатора цепей. Векторную калибровку схемы с целью учета систематических погрешностей измерений, а также последующие измерения можно выполнять традиционными методами [2], но с одним важным замечанием. При использовании периодических сигналов в качестве тестовых, спектр является линейчатым и обработку удобно организовать в частотной области, т.е., фактически путем сравнения комплексных амплитуд разных спектральных составляющих сигнала.

Однако на практике тест на EVM обычно выполняется при использовании сигналов модуляции, имеющих квазислучайный характер. В таком случае оценка импульсной характеристики тракта распространения сигнала может быть найдена как взаимная корреляционная функция входа и выхода [3]. Схема тестирования ретранслятора при помощи анализатора спектра показана на рис. 1. Генератор формирует входной сигнал. Ретранслятор при помощи встроенного гетеродина преобразует сигнал в другой диапазон частот. Выходной сигнал ретранслятора характеризует все произошедшие искажения сигнала. Для обеспечения частотной синхронизации приборов используется опорный сигнал 10 МГц, для запуска измерений используется триггер 1 с.



Рис. 1. Схема измерительной установки

Модель аналогового ретранслятора, работающего в линейном режиме, показана на рис. 2, б. Ретранслятор содержит мал шумящий

усилитель (МШУ) на входе, смеситель с опорным гетеродином (ОГ), набор полосовых фильтров (ПФ) и усилителей мощности (УМ) (рис. 2, а).

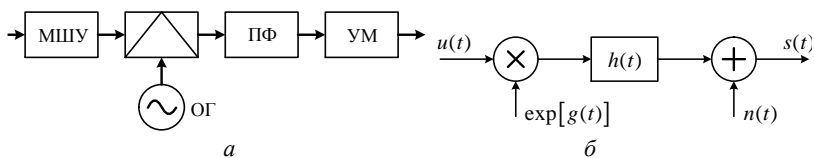


Рис. 2. Аналоговый ретранслятор (а) и его математическая модель (б)

Частотные искажения возникают преимущественно в полосовых фильтрах, которые установлены после смесителя. Запишем выражение, определяющее выходной сигнал:

$$s(t) = \{u(t) \cdot \exp[g(t)]\} \otimes h(t) + n(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – входной сигнал; $h(t)$ – импульсная характеристика тракта ретранслятора с учетом преобразования частоты; \otimes – знак свертки; $g(t)$ и $n(t)$ – мультипликативная и аддитивная помехи. Для задачи разработки алгоритмов обработки зарегистрированных сигналов t – дискретное время. Аддитивная помеха $n(t)$ моделирует тепловой «белый» шум, и дисперсия $n(t)$ определяется коэффициентом шума. Мультипликативная помеха моделирует амплитудный $a(t)$ и фазовый $\varphi(t)$ шум опорного генератора и может быть записана в виде

$$g(t) = a(t) + j\varphi(t). \quad (2)$$

Для формирования $\varphi(t)$ используется модель случайного процесса с экспоненциальной корреляционной функцией.

Модель (1) может быть использована для определения следующих параметров: модуль КП на центральной частоте; неравномерность модуля КП в диапазоне частот; неравномерность ГВЗ в диапазоне частот; ширина полосы частотного канала по заданному уровню; коэффициент шума; мощность фазового и амплитудного шумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А.Г. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры / Г.А. Орлов, Н.Н. Севастьянов; науч. ред. В.Н. Бранец. – Томск: ИД ТГУ, 2014. – 206 с.
2. Rytting D.K. Network Analyzer Error Models and Calibration Methods. 52nd ARFTG Conference, Short Course on Computer-Aided RF and Microwave Testing and Design, Dec. 1998. – 44 p.
3. Тисленко В.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2003. – 153 с.

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 621.396.67

СПОСОБ ОЦЕНКИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ РЛС С ПОМОЩЬЮ МАТРИЦЫ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

А.А. Горелов, студент; А.В. Картуков, ст. преп.

*Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 410 МАИ
г. Москва, МАИ, каф. 410, sasha.gorelov.2000@mail.ru*

Рассматриваются использование свойства матрицы плазменных образований отражать радиосигнал и способ оценки с помощью этого свойства диаграммы направленности антенны РЛС в дальней зоне.

Ключевые слова: матрица, плазменные образования, дальняя зона, влияние среды.

Диаграмма направленности антенны (ДНА) является одной из важнейших характеристик антенны, особенно когда речь идёт об антенне радиолокационной станции (РЛС), где от ширины и направления главного лепестка ДНА зависит работоспособность самой РЛС. На диаграмму направленности может повлиять множество внешних факторов, например физическое повреждение антенны или нахождение в ближней зоне антенны проводящих объектов.

Применительно к РЛС оценку фактической ДНА можно осуществить, например, по отраженному от известного объекта сигналу, как правило, от точечной цели (блестящей точки). Однако размещение подобной точечной цели невысоко над поверхностью земли приводит к попаданию в луч антенны подстилающей поверхности, что может привести к ошибочным выводам оценки. Размещение такого отражателя на борту БПЛА вертолётного типа могло бы быть эффективным, однако сам по себе БПЛА при полёте на основании ГНСС имеет ошибку местоопределения до нескольких метров и не даёт высокой точности оценки.

Таким образом, встаёт задача размещения точечного отражателя на такой высоте над землёй, чтобы в главный максимум не попадала подстилающая поверхность. Причём необходимо, чтобы координаты этого отражателя были известны с высокой точностью. Подобным точечным отражателем может быть плазменное образование, о чём пойдёт речь в данной работе далее.

Хорошо известна способность плазмы отражать электромагнитное излучение при плазменной частоте выше определенного значения [1, 2]. Данное свойство плазмы можно использовать для оценки работоспособности антенны. Суть способа заключается в создании плоской матрицы плазменных образований общими габаритами с половиной элемента разрешения РЛС в дальней зоне антенны, используя импульсный лазер и систему зеркал.

После процедуры фильтрации РЛС будет определять данный объект как точечный отражатель, координаты которого будут нам доподлинно известны, и, следовательно, оценка ДНА антенны может быть произведена с высокой точностью в контексте привязки к местности.

Примерный вид установки для генерации плазменных образований приведен на рис. 1.

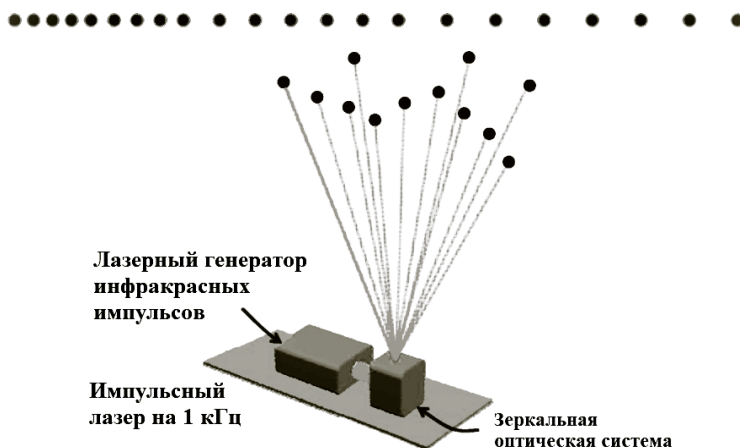


Рис. 1. Лазерная установка для создания плазменных образований

Для получения плазменных образований необходимо сфокусировать всю энергию лазерного излучения в одной точке на фокусном расстоянии, для этой цели используется система зеркал, с помощью

которой сначала лазерный пучок разбивают на несколько пучков, а после фокусируют их в необходимой точке пространства.

В данном исследовании был выбран за основу наиболее представленный в воздухе газ азот (N_2) для последующей его ионизации [3]. Так как лазерный пучок должен фокусироваться в дальней зоне РЛС, то энергия фотонов должна быть достаточна для преодоления данного расстояния и образования плазмы. Также должны учитываться возможные изменяющие воздушные среды: плотность, влажность, температура и прочие параметры. Общий вид предлагаемой установки приведен на рис. 2.

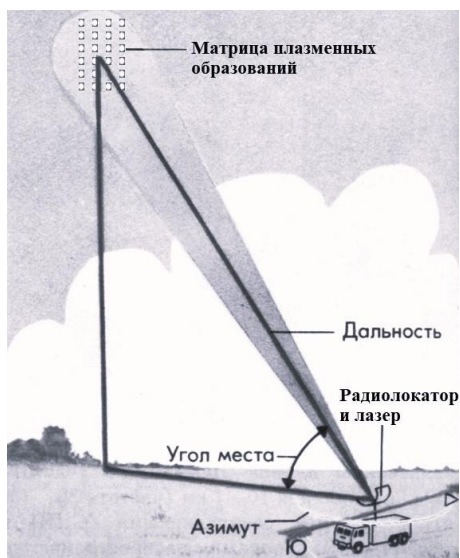


Рис. 2. Общий вид системы оценки ДНА РЛС с помощью плазменных образований

Данный метод оценки РЛС позволяет избежать нежелательных отражений от подстилающей поверхности, благодаря дальности расположения плазменных образований над землей, также, благодаря малым размерам ($R \approx 0,2355$ мм) этих образований и точного их расположения, которое мы задаем сами, можно избежать ошибок в определении местоположения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевяков И.А. Радиофизические свойства столкновительной плазмы газового разряда / И.А. Шевяков, В.И. Тамбовцев, А.А. Кучуркин // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. – Сер.: Математика. Механика. Физика. – 2013. – Т. 5, № 1. – С. 100–106.

2. Шевяков И.А. О радиопрозрачности естественного и возмущённого газа слоя D основания ионосферы / И.А. Шевяков, В.И. Тамбовцев, А.А. Кучуркин // Труды XI Междунар. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 297–299.

3. Голант В.Е. СВЧ-методы исследования плазмы. – М.: Наука, 1968. – 328 с.

УДК 621.315.592

ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ НАНОМЕТРОВЫХ ПЛЕНОК ИТО

А.С. Кузьмин, Т.В. Лузина, А.С. Терехова, студенты каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

*Проект ГПО ФЭ-1203. Спектральные методы анализа
тонких диэлектрических пленок*

г. Томск, ТУСУР, tas18102004@mail.ru

Методами атомно-силовой и туннельной микроскопии проведены исследования тонких пленок оксида индия, легированного оловом (ИТО), полученных методом магнетронного распыления из компактной мишени на кремниевых подложках, и установлены: структура запрещенной зоны, работа выхода, эффективная масса и положение уровня Ферми.

Ключевые слова: пленки ИТО, магнетронное распыление, атомно-силовая и туннельная микроскопия.

Тонкие пленки ИТО находят широкое применение в электронике и оптоэлектронике. В последнее время большое внимание уделяется исследованию в пленках плазмонного поверхностного и локализованного резонанса с целью создания оптических химических биосенсоров с высокой чувствительностью. Спектральная область применения этих пленок ограничивается частотой плазмонного резонанса [1,2], которая определяется по формуле

$$\omega_p = \left(\frac{n_0 \cdot e^2}{m_e^* \cdot \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где n_0 – эффективная масса свободных носителей заряда, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, m_e^* – эффективная масса электронов.

Главной задачей для применения этих пленок является получение необходимой концентрации электронов порядка 10^{21} – 10^{22} см⁻³.

В данной работе исследование пленок проводилось методами туннельной и атомно-силовой микроскопии. Исследование проводили

с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoEducator. На рис. 1 представлены фотографии поверхности пленки, полученные методами атомно-силовой (см. рис. 1, а) и туннельной микроскопии (см. рис. 1, б).

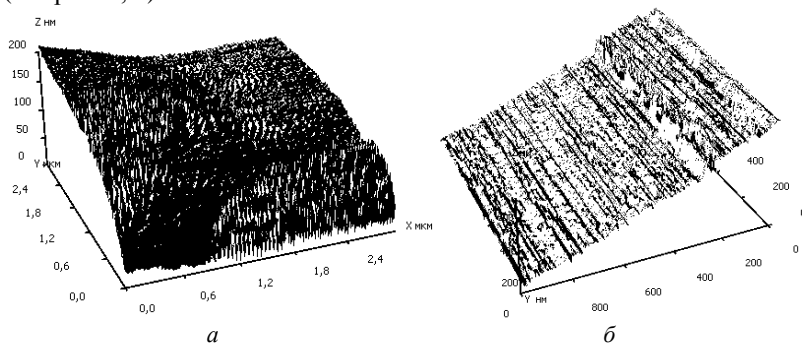


Рис. 1. Поверхность пленки ИТО: а – полученная методом атомно-силовой микроскопии; б – полученная методом туннельной микроскопии

В программе NanoEducator была снята вольт-амперная характеристика (ВАХ) туннельного контакта вольфрамовая игла–пленка ИТО, которая представлена на рис. 2.

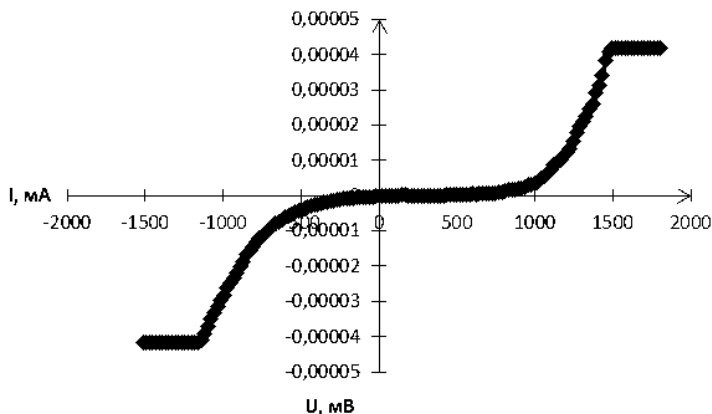


Рис. 2. ВАХ туннельного контакта вольфрамовая игла–пленка ИТО

Работа выхода определялась из формулы Симмонса [3] для туннельной ВАХ:

$$j = \frac{6,2 \cdot 10^{10}}{(\Delta s)^2} \{ \varphi \cdot \exp(-1,025 \Delta s \varphi^{1/2}) - (\varphi + V) \cdot \exp[-1,025 \Delta s (\varphi + V)^{1/2}] \}, \quad (2)$$

где Δs – расстояние между иглой и образцом, ϕ – работа выхода, j – плотность тока, V – напряжение.

Работа выхода была также получена из формулы Ричардсона

$$J_{s \rightarrow m} = A m^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right), \quad (3)$$

где $J_{s \rightarrow m}$ – плотность тока из полупроводника в металл, A – постоянная Ричардсона для свободных электронов, m^* – эффективная масса, T – температура, k – постоянная Больцмана.

Для туннельного тока эффективная масса равнялась эффективной массе свободных электронов, так как между пленкой и иглой был слой воздуха, где электроны ведут себя как свободные.

По этой же формуле при усредненной работе выхода, полученной по формулам Симмонса и Ричардсона, на основании ВАХ прямого контакта вольфрамовая игла – пленка ИТО была найдена эффективная масса пленки ИТО.

Далее был построен график зависимости производной тока по напряжению от напряжения смещения, представленный на рис. 3. По данному графику можно определить ширину запрещенной зоны, а также положения потолка запрещенной зоны и дна зоны проводимости.

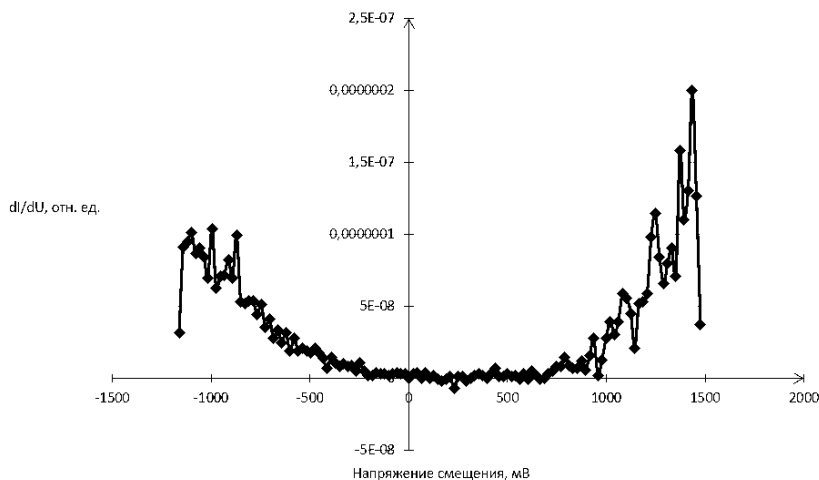


Рис. 3. График зависимости производной тока по напряжению от напряжения

Таким образом, получены данные об электронных свойствах пленок ИТО, таких как ширина запрещенной зоны, которая составила около 3 эВ, работа выхода электронов, равная 4,192 эВ, и эффектив-

ная масса электронов, равная $0,4m$, что необходимо для выбора условий возбуждения плазмонного резонанса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2022-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов С.В. Наноразмерные светопропускающие пленки In_2O_3 (SnO_2) с металлическим типом проводимости / С.В. Смирнов, О.Н. Минин, А.А. Чистоедова, А.Е. Петрюк // Нанотехнологии: разработка, применение. – XXI век. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 14–18.

2. Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors / Y. Zhidik, A. Ivanova, S. Smirnov, K. Zhidik, I. Yunusov, P. Trojn // Coatings. – 2022. – Vol. 12, № 12. – P. 1868.

3. Туннельные явления в твердых телах / под ред. Э. Бурштейна и С. Лундквиста. – М.: Мир, 1973. – 421 с.

УДК 537.533.9

ОБРАБОТКА КЕРАМИКИ ИЗ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

*А.В. Казаков, с.н.с. каф. физики, к.т.н.; А.С. Климов, проф.
каф. физики, д.т.н.; А.А. Лыман, магистр ПИШ
г. Томск, ТУСУР, andrei.v.kazakov@tusur.ru*

Обработка керамики из диоксида циркония импульсным электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений может приводить к изменению цвета обработанной поверхности, что также сопровождается изменением фазового состава керамики.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, циркониевая керамика, модификация поверхности.

Керамика на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием, благодаря своим исключительным свойствам, таким как высокая прочность, твердость и химическая устойчивость, является одним из широко востребованных материалов в различных отраслях науки и техники, таких как, например, электронная промышленность, металлургия и т.д. [1, 2]. Также керамика на основе диоксида циркония обладает высокой биосовместимостью, что обуславливает её использование в медицине для изготовления костных протезов [1, 2]. Исследований и работ, посвященных циркониевой керамике, достаточно много, в частности, интерес представляют методы обработки керамики для придания ей определенных свойств [2].

Для обработки керамики на основе диоксида циркония могут быть использованы форвакуумные плазменные источники электронов, преимуществом которых является возможность обрабатывать диэлектрические материалы, что обеспечивается вследствие нейтрализации отрицательного заряда на облучаемой мишени потоком ионов из пучковой плазмы [3]. Цель настоящей работы состояла в исследовании применения импульсного форвакуумного плазменного источника электронов для обработки керамики из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Экспериментальная установка. Обработка керамики из диоксида циркония ZrO_2 , стабилизированного иттрием Y_2O_3 (содержание оксида иттрия 5,15%), осуществлялась с помощью форвакуумного источника импульсного электронного пучка (рис. 1), описанного в [4]. Керамические образцы, которые были выполнены в виде дисков толщиной 4 мм и диаметром 16 мм, размещались на танталовых тиглях, которые устанавливались на системе перемещения, что позволяло обрабатывать несколько образцов без необходимости вскрытия вакуумной камеры. Давление в вакуумной камере составляло 8 Па, а в качестве рабочего газа использовался азот. Параметры импульсного электронного пучка, используемого для обработки образцов, регулировались с помощью системы питания форвакуумного плазменного источника электронов. При обработке образцов ускоряющее напряжение U_a составляло 9 кВ, ток I_e эмиссии изменялся от 30 до 70 А, длительность импульсов τ_d изменялась от 250 до 600 мкс, частота следования импульсов была 1 Гц. Варьирование указанными параметрами обеспечивало регулировку плотности энергии J_p электронного пучка в импульсе и мощность P_p пучка в импульсе. Обработка образцов осуществлялась сериями импульсов, количество N импульсов было до 25.

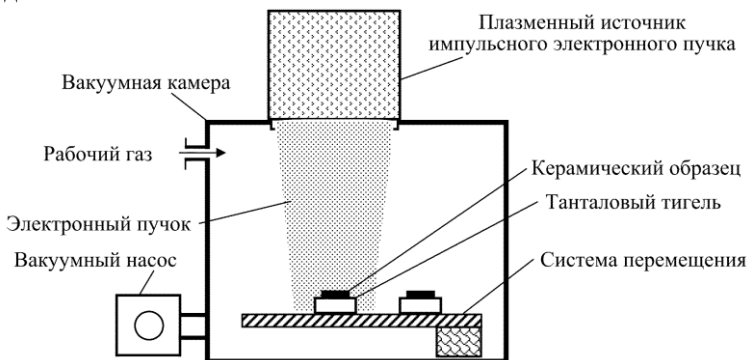


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Результаты экспериментов и их анализ. Обработка образцов из циркониевой керамики с помощью импульсного электронного пучка может приводить к изменению цвета обработанной поверхности образцов, при этом цвет изменяется при достижении пороговой плотности J_{e-b} энергии в импульсе. Цвет необработанных образцов – матово белый. При облучении электронным пучком с плотностью энергии J_e в импульсе менее пороговой ($J_e < J_{e-b}$) цвет поверхности образцов после обработки практически не изменяется, но поверхность может становиться глянцевой. При достижении пороговой плотности энергии $J_{e-b} \approx 21$ Дж/см² и мощности P_p не менее 320 кВт/имп. в процессе обработки импульсами электронного пучка наблюдается постепенное потемнение керамического образца, в результате чего после обработки серией импульсов, количество которых составляет не менее 10, облучаемая поверхность становится черной. При $J_e > J_{e-b}$ и P_p не менее 320 кВт/имп. увеличение J_e приводит к почернению образца после меньшего количества импульсов N . Это приводит к тому, что при $J_e > 24\text{--}25$ Дж/см² обработанная поверхность приобретает черный цвет после единичного импульса электронного пучка (т.е. $N = 1$ импульс). Исследования образцов с помощью рентгенофазного анализатора Shimadzu XRD 6100 показали, что изменение цвета сопровождается изменением фазового состава. Используемые керамические образцы содержат три кристаллические фазы: кубическую ZrO₂ SG 225, тетрагональную ZrO₂ SG 137 и кубическую Y₂O₃ SG 206 (рис. 2, а). Обработка керамических образцов, например, при плотности энергии в импульсе электронного пучка $J_e > 24\text{--}25$ Дж/см² может приводить к существенному увеличению содержания тетрагональной фазы SG 137 (рис. 2, б).

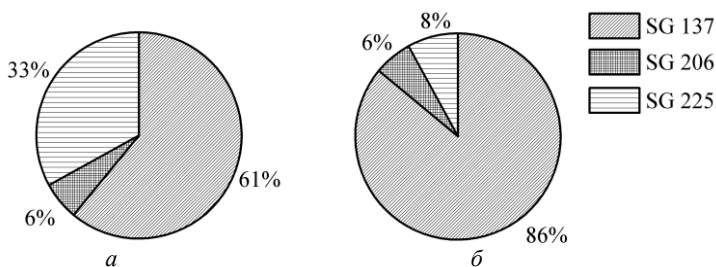


Рис. 2. Фазовый состав керамических образцов: а – исходный (необработанный) образец; б – обработанный образец, $J_e > 24\text{--}25$ Дж/см²

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров П.П. Диоксид циркония. Обзор / П.П. Федоров, Е.Г. Яроцкая // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2021. – Т. 23. – С. 169–187.
2. Review of zirconia-based bioceramic: Surface modification and cellular response / G. Soon, B. Pingguan-Murphy, K.W. Lai, S.A. Akbar // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42. – P. 12543–12555.
3. Бурдовицин В.А. и др. Форвакуумные плазменные источники электронов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.
4. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91. – Art. No. 093304.

ПОДСЕКЦИЯ 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н.;
зам. председателя – Оскирко В.О., н.с. лаборатории прикладной
электроники ИСЭ СО РАН, технический директор
ООО «Прикладная электроника», к.т.н.;
Михальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.*

УДК 621.311.69

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РАДИОСВЯЗИ

*А.И. Бартенев, аспирант; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР*

Рассмотрены схемы построения систем электропитания мобильных комплексов связи, предложено решение, позволяющее снизить стоимость и повысить надёжность.

Ключевые слова: мобильный комплекс связи, система электропитания.

Развитие систем радиосвязи с применением цифровых способов обработки сигнала (информации), а также увеличение передаваемого трафика (информации) предъявляет высокие требования к качеству электрической энергии при одновременном повышении требований к энергетической эффективности преобразователей [1]. В настоящее время вектор развития систем радиосвязи совместно с увеличением передаваемого трафика нацелен на расширение площади покрытия территорий качественной связью и интернетом. Для обеспечения данной потребности ежегодно вводятся в эксплуатацию новые вышки-ретрансляторы, строительство которых может занимать до нескольких лет. Для обеспечения связью в труднодоступной местности или установления связи на непродолжительный период применяются мобильные комплексы связи [2]. В зависимости от потребностей связь может быть установлена на малом радиусе действия за счёт портативных раций и портативных станций (рис. 1) или на большом радиусе действия, посредством мобильных комплексов (рис. 2), размещённых на

шасси автомобилей, как правило, повышенной проходимости типа ГАЗ, МАЗ, КАМАЗ и даже УРАЛ [3].

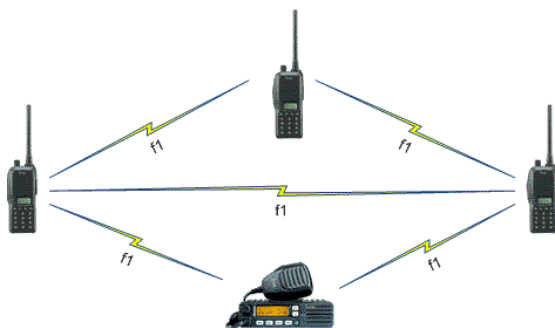


Рис. 1. Система связи малого радиуса действия



Рис. 2. Мобильный комплекс связи на базе автомобиля КАМАЗ [4]

Исходя из задач, поставленных перед системой связи, возникают отличия не только в массе и габаритах радиостанции. Для обработки большого объема информации требуется значительный вычислительный ресурс, а для его передачи на большие расстояния применяют передатчики «большой» мощности совместно с антеннами, расположенными на мачтовых устройствах (20–50 м), обеспечивающих прямую видимость по радиоканалу [5].

Как правило, системы связи малого радиуса действия получают электропитание от сменных или интегрированных в их корпус АКБ. Система электропитания мобильных комплексов связи является сложной технической задачей. Обеспечение электропитания данных комплексов реализуется различными способами:

– при невысокой потребляемой мощности оборудование может быть запитано от бортовой сети шасси (12 или 24 В, в зависимости от

применяемого шасси). В данном случае непрерывность электропитание обеспечивает АКБ, установленная на шасси автомобиля, а поддержание его заряда переключается на генератор автомобиля;

– при высокой мощности, потребляемой системой связи, или большом количестве дополнительного оборудования электропитание обеспечивается от стационарной электросети или электрогенератора с применением системы гарантированного электропитания (СГЭП). Недостаток данного способа реализации электропитания – это отсутствие возможности поддержания связи в движении, значительная стоимость СГЭП и электрогенератора, а также снижение надёжности за счёт применения большого количества компонентов, в том числе механических и электромеханических.

При проработке данных вариантов реализации системы электропитания принято решение о проработке первого варианта с питанием от АКБ (24 В), но при средней потребляемой мощности около 500 Вт, при размещении основных потребителей на мачте, площадь поперечного сечения питающего кабеля сильно увеличивается вследствие высоких протекающих токов, а также сильно увеличивается его масса.

Для снижения величины протекающих токов предложено установить повышающий преобразователь требуемой мощности для питания мачтового (выносного) оборудования. Данный способ реализации системы питания позволяет исключить из состава электрогенератор и СГЭП, частично переложив функции СГЭП на АКБ шасси автомобиля. Повышающий преобразователь в данном случае должен иметь изолированный выход от входа и от шин заземления, спроектированный по правилам электробезопасности. На рис. 3 приведена блок-схема предлагаемой системы электропитания мобильного комплекса радиосвязи.

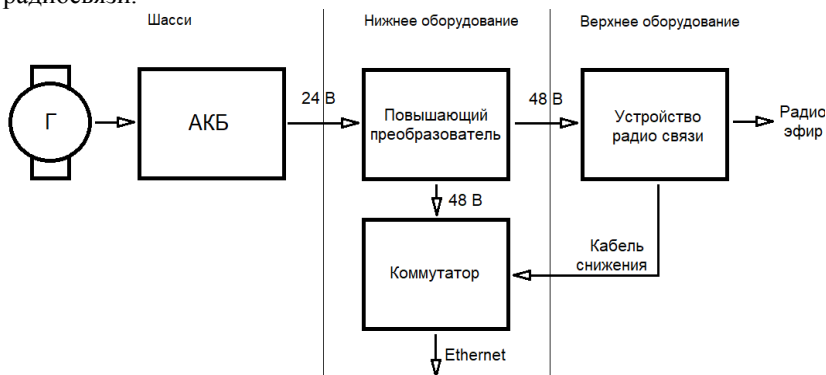


Рис. 3. Блок-схема предлагаемой системы электропитания мобильного комплекса радиосвязи

Типовой диапазон выходного напряжения для телекоммуникационной аппаратуры радиосвязи лежит в пределах от 38 до 72 В, с номинальным напряжением 48 В. Данный диапазон обоснован применением АКБ в буферном режиме. При применении СГЭП с 4 последовательно включенными кислотными 12 В АКБ в буферном режиме напряжение составит 53 В. При применении повышающего преобразователя с выходным напряжением 53 В площадь поперечного сечения кабеля питания мачтового оборудования уменьшится в 2 раза. При применении СГЭП с 5 последовательно включенными кислотными 12 В АКБ напряжение составит 67 В, а площадь поперечного сечения кабеля питания мачтового оборудования уменьшится в 2,5 раза.

Таким образом, применение предложенной системы электропитания позволит снизить массу кабеля питания мачтового оборудования и повысить надёжность мобильного комплекса связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов О.А. Электропитание систем радиосвязи / О.А. Белоусов, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 85 с.
2. Градусов Р.А. Организация и структура полевых узлов связи объединения / Р.А. Градусов, С.Н. Касанин. – Минск: БГУИР, 2012. –120 с.
3. Мобильные комплексы связи, передвижные пункты управления МЧС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: httphttps://kr-kaf.ru/civil_products/transport_for_communication1/ (дата обращения: 10.03.2024).
4. Подвижный пункт управления и связи ПУС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.micran.ru/productions/mobile/МС/> (дата обращения: 08.03.2024).
5. Системы радиосвязи и организация радиосвязи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asvagroup.com/2014/11/sistemyi-radiosvyazi-i-organizatsiya-radiosvyazi/> (дата обращения: 11.03.2024).

УДК 621.38

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

*И.А. Чернецкий, аспирант; В.Д. Семенов, проф., к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, darkblackstudent@gmail.com*

Рассмотрена работа имитационной модели АВН для мобильного комплекса энергоснабжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, мобильный комплекс энергоснабжения.

Мобильный комплекс энергоснабжения состоит из двигателя внутреннего сгорания (ДВС), синхронного генератора (СГ) и активно-

го выпрямителя напряжения (АВН). В этой статье мы рассмотрели работу АВН в характерном режиме работы.

Характерный режим работы подразумевает стабильное выходное напряжение на выходе АВН 650 В с максимальной выходной мощностью 8 кВт. При этом частота вращения ротора ДВС может изменяться от 1100 до 6 000 об/мин. Функциональная схема АВН показана на рис. 1.

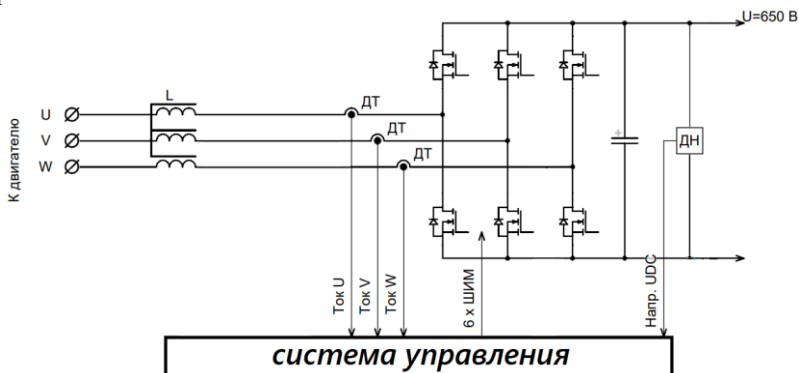


Рис. 1. Функциональная схема АВН

Принцип работы АВН заключается в том, что преобразователь работает в режиме рекуперации энергии по аналогии с «режимом торможения» троллейбуса [1]. В нашем случае этот режим работы преобразователя будет основным режимом. Увеличивая момент на валу двигателя, возможно добиться стабильного выходного напряжения преобразователя.

В ходе работы мы выбрали векторное управление АВН как наиболее современное и подходящее к нашей задаче. Принцип работы векторной системы управления подробно изложен в статье А.С. Плехова, Д.Ю. Титова и др. [2]. Такая система управления реализуется в синхронной ортогональной системе координат (x, y) , ориентированной по вектору напряжения сети \vec{U} , что позволяет отдельно управлять активной и реактивной составляющими вектора входного тока выпрямителя.

Имитационная модель преобразователя изображена на рис. 2. ДВС на входе преобразователя здесь был заменен на источник синусоидального напряжения. Подразумевается, что, изменяя частоту и амплитуду напряжения, мы сможем исследовать работу преобразователя в характерном режиме работы. Блок преобразования координат в модели осуществляет преобразование проекций обобщенного вектора

сетевого тока из вращающейся системы координат к трехфазной системе токов. Блок релейных регуляторов содержит шесть каналов управления переключающими компонентами схемы. Принцип построения такой модели рассмотрел в своей работе Герман-Галкин [3].

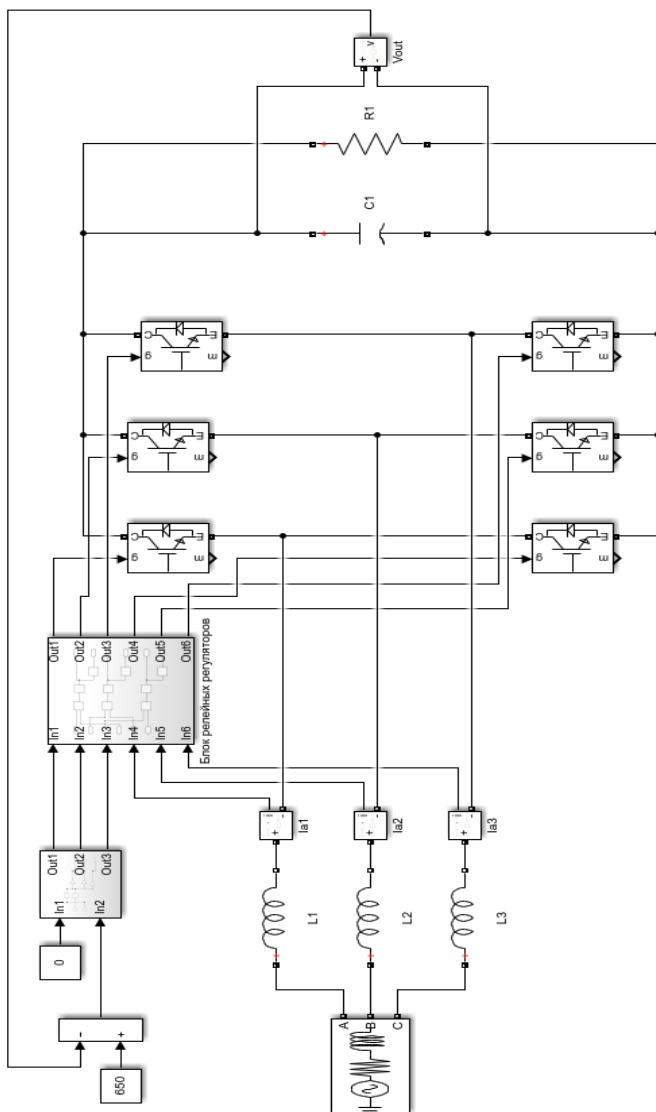


Рис. 2. Имитационная модель АВН в среде Matlab Simulink

На рис. 3 представлены желаемые временные диаграммы выходного напряжения АВН при различных входных напряжениях. Выходное напряжение преобразователя изменяется при изменении частоты напряжения на некоторое значение. Однако это удовлетворяет нашим требованиям к преобразователю и показывает, что преобразователь способен работать в характерном режиме работы для мобильного комплекса энергоснабжения.

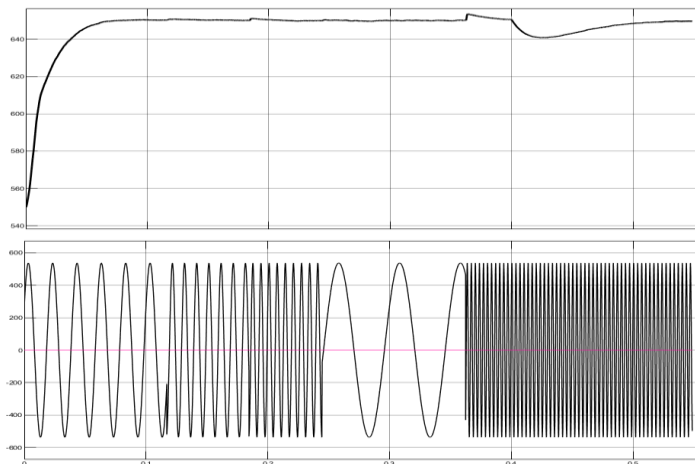


Рис. 3. Временные диаграммы

Необходимо отметить, что в форме напряжения будут присутствовать провалы выходного напряжения из-за настроек системы управления. Устранить данные искажения возможно при помощи введения в систему управления дополнительного корректирующего звена.

Дальнейшее исследование будет посвящено разработке улучшенной системы управления АВН, получению частотных характеристик преобразователя и формированию корректирующего звена.

Результаты данного исследования можно использовать для проектирования и разработки систем мобильного энергоснабжения, работающих от ДВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов М.Д. Векторное управление активным выпрямителем напряжения // Молодой ученый. – 2016. – № 9 (113). – С. 184–189.
2. Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством активного выпрямителя напряжения / А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Ю.В. Шевырев, Н.Ю. Шевырева // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 101–111.
3. Герман-Галкин С. Моделирование устройств силовой электроники: урок 10 // Силовая электроника. – 2009. – № 4. – С. 102–107.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

К.Ж. Калжанов, аспирант; В.Д. Семенов, проф., к.т.н.

Научный руководитель В. Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, svd@ie.tusur.ru

Данная статья посвящена математическому моделированию активного выпрямителя напряжения для применения полупроводниковых преобразователей, включенных в замкнутую систему рекуперации энергии. Для моделирования используются блоки библиотек MatLab Simulink.

Ключевые слова: активный выпрямитель, векторное управление, имитационная модель преобразователя.

Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой эффективное устройство, способное функционировать в режиме выпрямителя при передаче энергии из сети переменного тока в электродвигатель постоянного тока. Одновременно он может действовать как инвертор в процессе рекуперации энергии, направляя ее обратно в сеть. АВН основан на технологии прямого преобразования постоянного напряжения повышающего типа. Это устройство отличается от традиционных решений тем, что требует включения токоограничивающего дросселя, что упрощает его конструкцию и повышает эффективность работ [1].

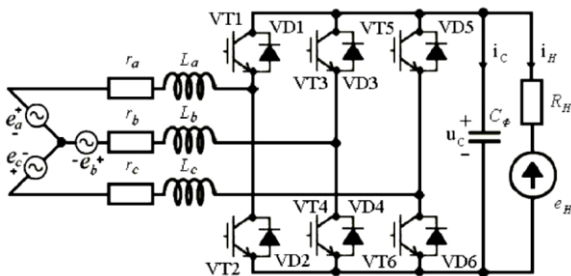


Рис. 1. Трехфазный активный выпрямитель напряжения

Целью данной работы является создание имитационной модели АВН, которая будет использована в процессе разработки системы электроснабжения подвижного автономного объекта с каналом генерирования электроэнергии переменного тока переменной частоты.

Для моделирования используются блоки библиотек MatLab Simulink. Имитационная модель состоит из 3-фазной внешней сети

(ABC), выпрямителя (АПН) на основе IGBT транзисторов, емкостного фильтра и нагрузки. В системе управления использованы блок XY-ABC преобразования вращающейся системы координат и блок релейных регуляторов.

На рис. 2 представлена имитационная модель трехфазного АВН, разработанная на основе блоков, приведенных в [2].

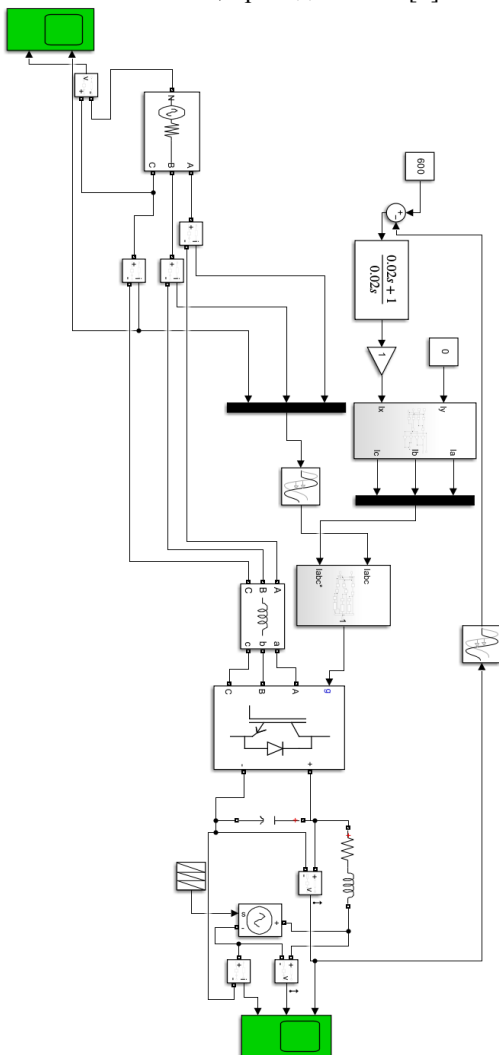


Рис. 2. Имитационная модель трехфазного АВН

В качестве нагрузки силового преобразователя на первом этапе моделирования используется RL -цепь и источник ЭДС. Замена справедлива для систем постоянного тока с широтно-импульсным управлением.

Блок «XY-ABC» преобразования вращающейся системы координат (рис. 3) системы управления производит трансформацию проекций I_x и I_y обобщенного вектора сетевого тока, представленного во вращающейся системе координат, в трехфазную систему токов i_A , i_B , i_C . Этот процесс не только обеспечивает точное преобразование данных, но также включает в себя дополнительные алгоритмы коррекции, обеспечивающие стабильность и эффективность работы системы в различных режимах.

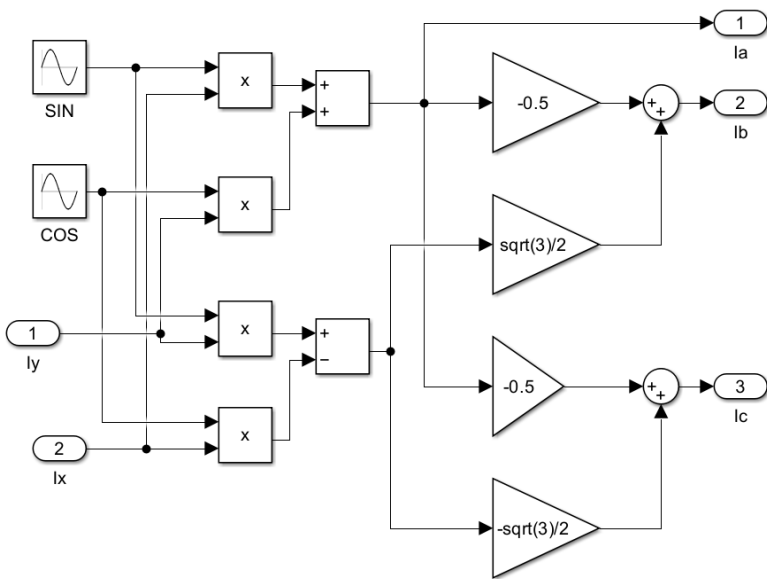


Рис. 3. Система управления блока «XY-ABC»

Блок релейных регуляторов (рис. 4), представляющий собой трехканальную систему, эффективно формирует гармоническую структуру сетевых токов. Этот блок реализует алгоритмы, позволяющие точно регулировать момент включения и выключения силовых ключей в активном выпрямителе напряжения (АВН).

В имитационной модели изменение напряжения источника ЭДС меняется от 0 до 1 000 В. Осциллограмма выходного напряжения, тока и напряжения источника ЭДС представлена на рис. 5.

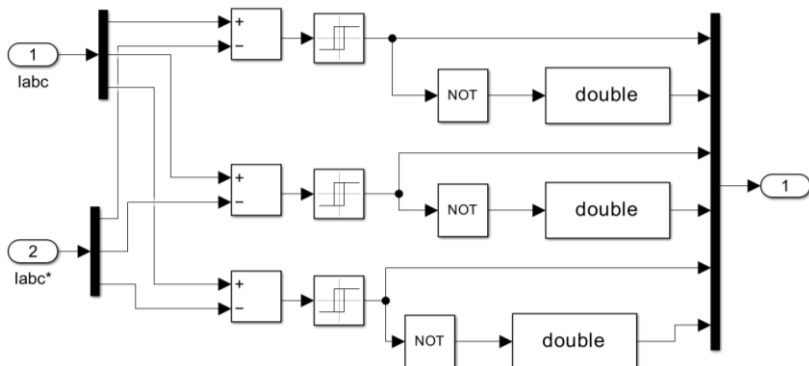


Рис. 4. Блок релейных регуляторов

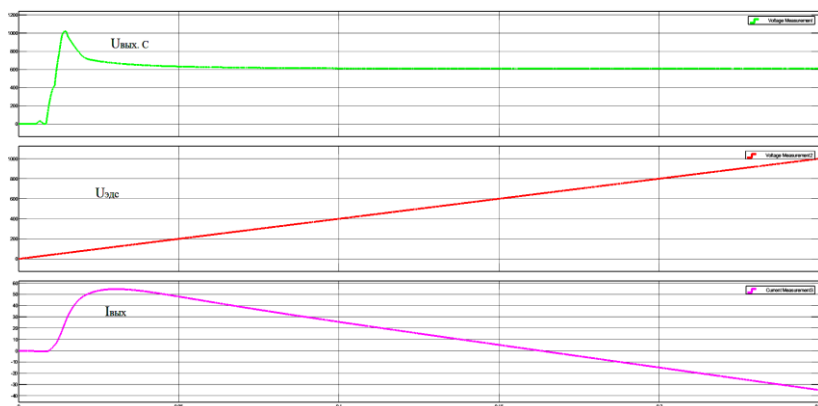


Рис. 5. Работа АВН в инверторном режиме

На рис. 5 видно, что напряжение на конденсаторе ($U_{\text{вых,с}}$) остается на одном уровне 600 В. При изменении уровня напряжения источника ЭДС от 0 до 600 В ток нагрузки положительный – АВН работает в выпрямительный режим, а при напряжении источника ЭДС выше напряжения 600 В ток отрицательный – АВН работает в рекуперационном режиме.

Заключение. Среда MatLab Simulink является мощным инструментом для моделирования активного выпрямителя напряжения, позволяющим эффективно проводить анализ и оптимизацию работы данного устройства. Имитационная модель АВН в этой среде может ускорить и удешевить разработку и проектирование систем электропитания подвижных автономных объектов при различных режимах работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов А.А. Активные преобразователи в регулируемых приводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер. – Новоуральск: НГТИ, 2001. – 250 с.
2. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2012. – 768 с.

УДК 621.314.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ФЭУ

Д.А. Кудяков, магистрант каф. ПрЭ

*Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, pixel@mail2000.ru*

Исследована схема активного фильтра на основе операционного усилителя для снижения пульсаций высоковольтного преобразователя для питания ФЭУ, приведены ее основные достоинства и недостатки, проведено имитационное моделирование схемы, с помощью которого получены осциллограммы напряжений и частотные характеристики.

Ключевые слова: активный фильтр, операционный усилитель, пульсации, частотные характеристики.

В современной электронике широкое применение получили высокочастотные преобразователи постоянного напряжения с пассивными фильтрами в виде RLC -цепей. Для достижения низкого уровня пульсаций в схемах приходится применять конденсаторы с достаточно большой емкостью или индуктивностью, что приводит к увеличению стоимости и габаритов готового устройства.

При проектировании маломощных высоковольтных преобразователей для питания фотоэлектронных умножителей стабильность питающего напряжения и его малые пульсации играют важную роль, потому что с изменением светового потока, попадающего в окно ФЭУ, растет ток его потребления. При этом снижается напряжение питания за счет падения на резисторах фильтра, изменяется коэффициент усиления, искажается амплитуда выходного сигнала и ухудшается точность дальнейшего измерения. Также пульсации напряжения питания ФЭУ отрицательно влияют на достоверную регистрацию слабых вспышек, которые имеют низкую амплитуду.

Поэтому в работе предлагается использовать активный фильтр вместо пассивного, который лишен всех этих недостатков. Рассматриваемая топология фильтра [1] и схема с рекомендуемыми номиналами компонентов [2] показаны на рис. 1.

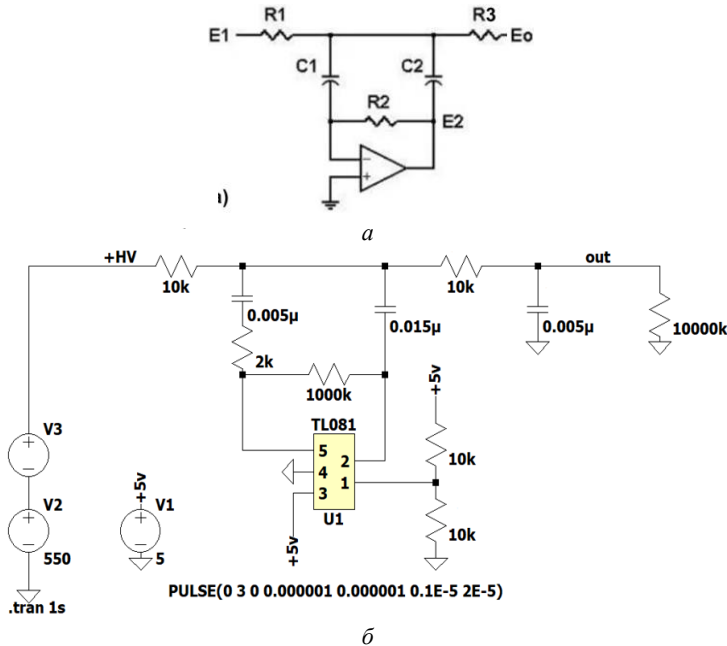


Рис. 1. Топология активного фильтра – а и его имитационная модель – б

Схема представляет собой гибридное включение обычной RC-цепи и Т-образной обратной связи, работающей как Т-образный фильтр низких частот (R1, R3, C1–C2).

Конденсатор C1, подключенный ко входу ОУ, пропускает только пульсации, исключая постоянную составляющую. Усилитель одновременно усиливает пульсации и инвертирует их фазу. Конденсатор C2 с выхода ОУ подает усиленные и инвертированные пульсации обратно в линию питания постоянного тока. Коэффициент усиления усилителя многократно увеличивает эффективность выходного конденсатора в уменьшении пульсаций. Таким образом, эффективная емкость фильтра может в тысячи раз превышать емкость примененного конденсатора в схеме.

Делитель напряжения на неинвертирующем входе в имитационной модели обеспечивает смещение рабочей точки для питания операционного усилителя от однополярного источника. На рис. 2 представлены осциллограммы входного напряжения 550 В с пульсациями 3 В (см. верхний график на рис. 2) и выходного напряжения после фильтра (см. нижний график на рис. 2), а на рис. 3 представлена АЧХ схемы, полученная на имитационной модели.

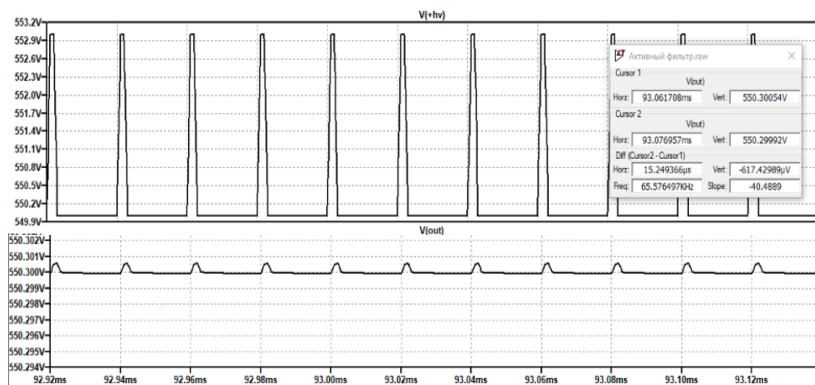


Рис. 2. Осциллограмма напряжений

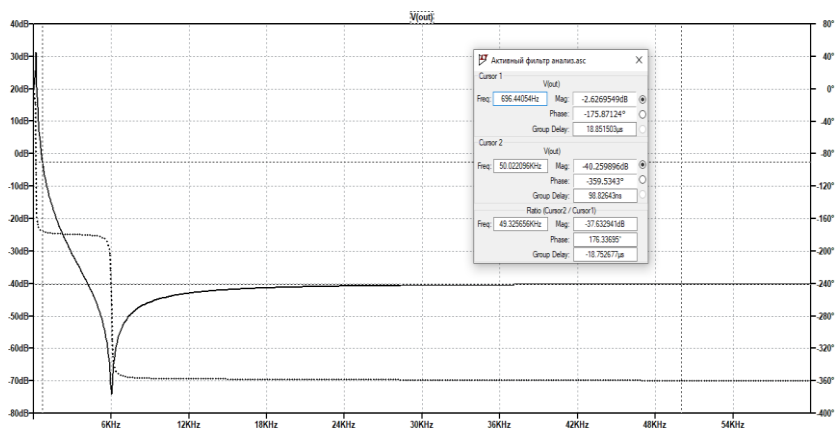


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика фильтра

С выбранными значениями компонентов фильтра были получены следующие характеристики:

- пульсации выходного напряжения – 0,6 мВ;
- частота среза (ослабление на -3 дБ) – 700 Гц;
- ослабление на частоте работы преобразователя (50 кГц) – -40 дБ;
- максимальное ослабление (6 кГц) – -70 дБ.

Как видно из графика АЧХ (см. рис. 3), максимальное ослабление происходит на частоте 6 кГц, а при рабочей частоте преобразователя 50 кГц ослабление составляет -40 дБ.

Путем оптимизации номинальных значений элементов фильтра и добавления последовательных резисторов удалось снизить пульсации напряжения, а также увеличить ослабление фильтра на частоте 50 кГц до 75 дБ (рис. 4).

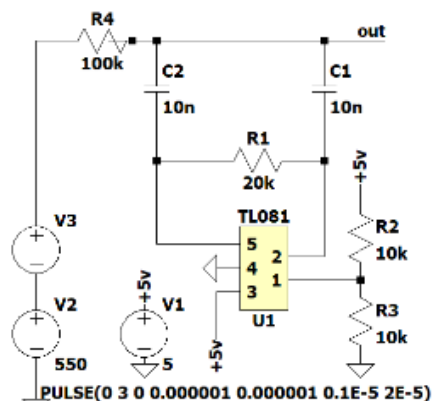
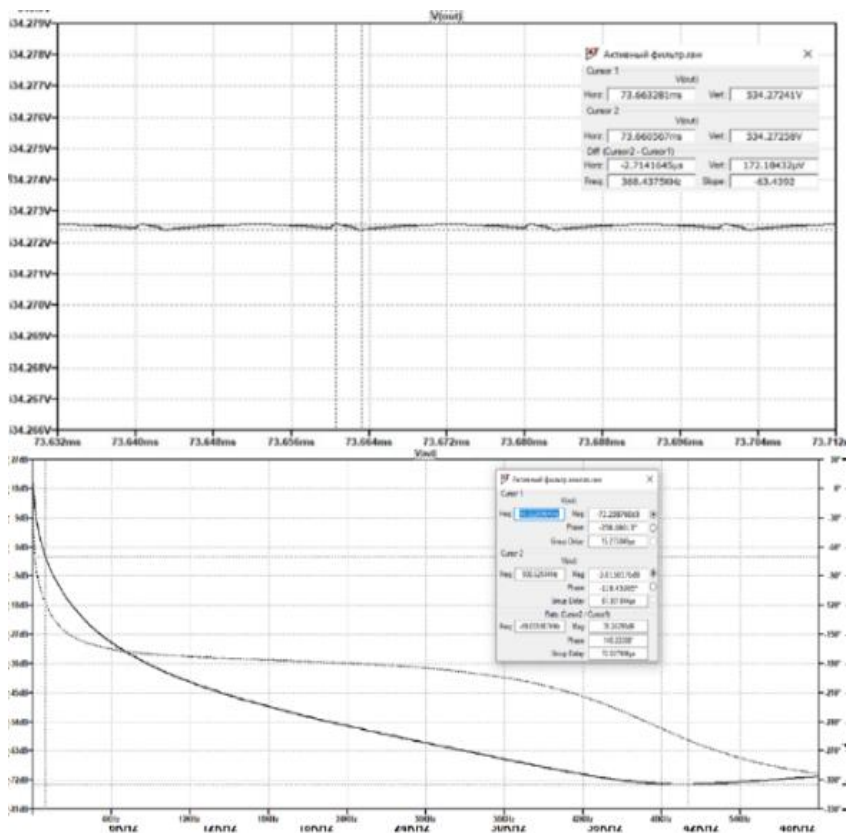


Рис. 4. Осциллограмма напряжений и АЧХ

С оптимизированными значениями компонентов фильтра были получены следующие характеристики: пульсации выходного напряжения – 0,17 мВ; частота среза (ослабление на –3 дБ) – 590 Гц; ослабление на частоте работы преобразователя (50 кГц) – –75 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Capacitor amplifier reduces ripple without dc loss [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edn.com/capacitor-amplifier-reduces-ripple-without-dc-loss/#>, свободный (дата обращения: 02.03.2024).

2. An adjustable 0 to 1500V+, regulated, low ripple HV power supply for powering PMT's and geiger tubes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://charliethompson.50megs.com/LowRippleHVsupply.html>, свободный (дата обращения: 02.03.2024).

3. Zero offset active lowpass filter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edn.com/zero-offset-active-lowpass-filter-part-1/>, свободный (дата обращения: 02.03.2024).

УДК 621.38

СИЛОВАЯ ЯЧЕЙКА Понижающего DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ БЛОКА СТАБИЛИЗАЦИИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

К.А. Редлих, аспирант; В.Д. Семенов, проф., к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, redlih25kirill@yandex.ru

Рассмотрен один из способов реализации силовой ячейки понижающего DC/DC-преобразователя модульного типа, построенной на основе мостового инвертора напряжения.

Ключевые слова: DC/DC-преобразователь, мостовой инвертор напряжения.

Системы электроснабжения (СЭС) играют ключевую роль в обеспечении надежной и бесперебойной работы автономных объектов. Наиболее популярным решением в данной области является организация СЭС с использованием двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в качестве источника механической энергии, используемой для генерации энергии электрического тока с помощью электрогенератора [1]. Стабилизация выходных параметров и их регулирование в СЭС данного типа осуществляются с помощью электронного блока преобразования энергии переменного тока электрогенератора [2] (БСиРН), представляющего собой активный трёхфазный выпрямитель напряжения и импульсный понижающий DC/DC-преобразователь модульного типа.

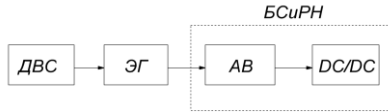


Рис. 1. Структурная схема электрогенераторной СЭС

Целью данной работы является создание имитационной модели DC/DC-преобразователя для синтеза корректирующего звена. Понижающий DC/DC-преобразователь напряжения модульного типа состоит из нескольких силовых ячеек, соединенных параллельно. Каждая ячейка модульного преобразователя представляет собой мостовой преобразователь с широтно-импульсным управлением, выход которого подключен к первичной обмотке понижающего трансформатора напряжения, вторичная обмотка трансформатора подключена к мостовому выпрямителю и LC-фильтру. Номинальная мощность реализуемой силовой ячейки составляет 2 кВт при выходном напряжении +28,5 В и входном напряжении 650 В. Частота работы ШИМ 50 кГц, индуктивность дросселя 4 мкГн, ёмкость выходного фильтра 511 мкФ. Имитационная модель силовой ячейки понижающего DC/DC-преобразователя представлена на рис. 2.

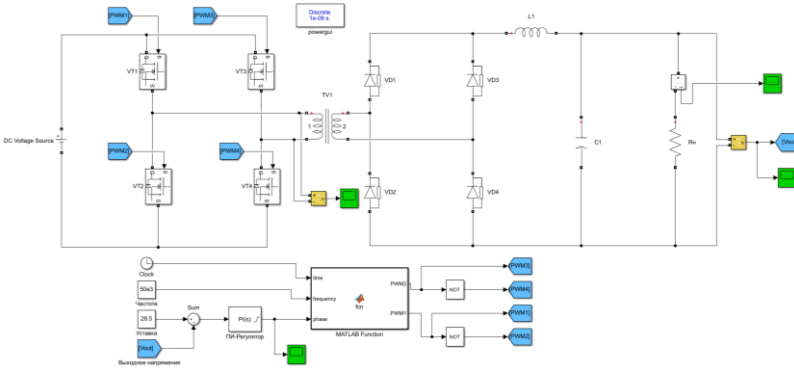


Рис. 2. Имитационная модель силовой ячейки понижающего DC/DC-преобразователя

Система управления реализована следующим образом: сигнал о выходном напряжении преобразователя вычитается из значения сигнала напряжения установки, после чего сигнал ошибки поступает на вход ПИ-регулятора, выходной сигнал которого является сигналом, регулирующим фазовый сдвиг сигналов управления силовыми транзисторами. ШИМ реализован программно и представлен в виде блока

MATLAB Function. Листинг программы блока генерации ШИМ представлен на рис. 3.

```
function [PWM2, PWM1] = fcn(time,frequency,phase)
    Tswitching = 1/frequency;
    PWM1 = 0;
    PWM2 = 0;
    y1 = mod(time,Tswitching);
    if y1 < Tswitching/2
        PWM1 = 1;
    end
    t_phi = Tswitching*phase/360;
    y2= mod(time+t_phi, Tswitching);
    if y2 < Tswitching/2
        PWM2=1;
    end
end
```

Рис. 3. Листинг программы блока генерации ШИМ

Напряжение первичной обмотки трансформатора и выходное напряжение преобразователя представлены на рис. 4, 5 соответственно.

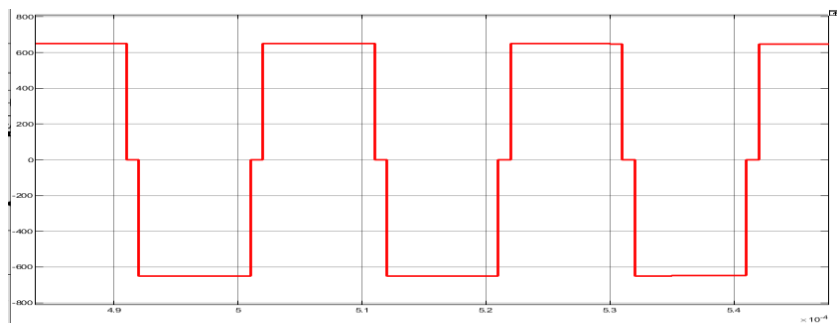


Рис. 4. Напряжение первичной обмотки трансформатора

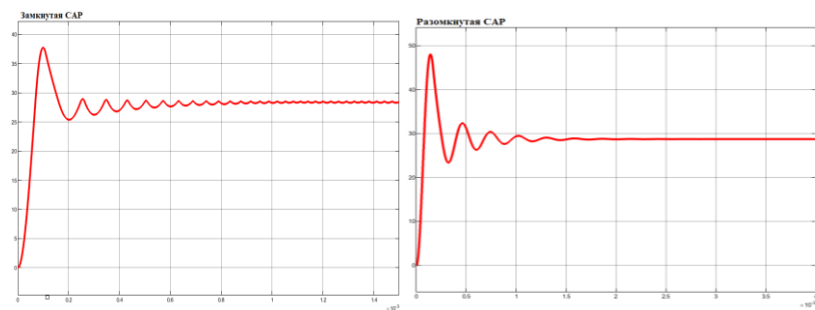


Рис. 5. Выходное напряжение преобразователя при замкнутой и разомкнутой системе автоматического регулирования

Диаграммы выходного напряжения, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о недостаточной корректировке системы автоматического регулирования и малом запасе по фазе. При этом модель можно использовать для проверки корректирующего звена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харитонов А.С. Анализ системы электроснабжения постоянного тока летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – 208 с.
2. Кучак С.В. Система электроснабжения на базе электрогенераторной установки и литий-ионного накопителя с улучшенными динамическими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2020. – 138 с.

УДК 621.314

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ИЗМЕНЯЕМЫМ ЧИСЛОМ УНИФИЦИРОВАННЫХ АВТОНОМНЫХ МОДУЛЕЙ

К.А. Ахтырский, аспирант каф. ПрЭ;

В.А. Кабиров, гл. инженер ООО «ВИП Электроника», к.т.н.;

В.Д. Семенов, проф., с.н.с. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, k.akhtirsky@gmail.com

Рассматривается структура системы электропитания с изменяемым числом унифицированных автономных модулей стабилизации напряжения, позволяющая реализовывать резервированные системы электропитания различного назначения по блочно-модульной архитектуре.

Ключевые слова: модульная система электропитания, ненагруженное резервирование, цифровая система управления, энергообразующий комплекс.

В настоящее время важной задачей является разработка систем электропитания (СЭП) для оборудования военного, космического, промышленного и общего назначения, обладающих повышенными характеристиками надежности [1]. Одним из способов повышения надежности СЭП является резервирование элементов, входящих в ее состав [2, 3]. Перспективным направлением разработок является создание СЭП по блочно-модульной архитектуре [4, 5]. Такая архитектура позволяет не только повысить надежность всей СЭП, но и облегчить процесс обслуживания такой системы благодаря возможности замены модулей в ее составе без отключения всей системы. Кроме того, на основе одних и тех же унифицированных автономных модулей могут быть построены СЭП, рассчитанные на различную выходную мощность и заданное количество отказов. Такой подход позволя-

244

ет удешевить производство новых систем за счет использования уже разработанных и применяемых унифицированных модулей в СЭП, рассчитанной на большую или меньшую выходную мощность путем наращивания или уменьшения количества модулей в составе системы.

Недостатком современных разработок в области модульных СЭП является недостаточная проработка вопроса ненагруженного резервирования модулей в составе СЭП. Так, в работе [4] предложено использование блочно-модульной архитектуры для создания энергопреобразующего комплекса (ЭПК) СЭП КА с цифровой системой управления на основе унифицированных модулей стабилизации напряжения (МСН). Недостатком данной работы является то, что в ней не рассмотрены вопросы нагруженного и ненагруженного резервирования модулей.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что в настоящее время существует потребность в более глубокой проработке вопросов ненагруженного и нагруженного резервирования при построении СЭП по блочно-модульной архитектуре.

В данной работе предлагается структурная схема СЭП, построенная по блочно-модульной архитектуре, рассчитанная на использование от 1 до N унифицированных автономных модулей в своем составе (рис. 1). Каждый унифицированный модуль стабилизации напряжения (МСН1...МСН N) имеет одинаковую структуру и включает в себя следующие блоки: вспомогательный источник питания (ВИП), выполняющий функцию обеспечения питанием всех блоков модуля, а также отключения модуля (по телекоманде включения/выключения или команде от логического контроллера), импульсный преобразователь напряжения (ИПН), датчики тока и напряжения (ДТ и ДН соответственно), сумматоры $C1$ и $C2$, корректирующие звенья (КЗ), фильтры $F1$ и $F2$, буферный усилитель, передатчик и приемник цифрового интерфейса связи (Пер. ЦИС и Пр. ЦИС соответственно), логический контроллер (ЛК) и элемент выбора медианного сигнала (ЭВСМ).

Ввод модулей в режим ненагруженного резервирования осуществляется двумя способами:

- Подачей на вход соответствующего модуля телекоманды включения/выключения (ТКВ) от внешнего управляющего устройства.
- Подачей сигнала о вводе модуля в режим ненагруженного резервирования от логического контроллера соответствующего модуля.

Данные сигналы поступают на ВИП, который в этом случае отключает питание своего модуля. Все модули обмениваются между собой сигналами управляющего воздействия (СУВ) по напряжению, а также информацией о состоянии модуля (поступает с ЛК) с помощью передатчика ЦИС.

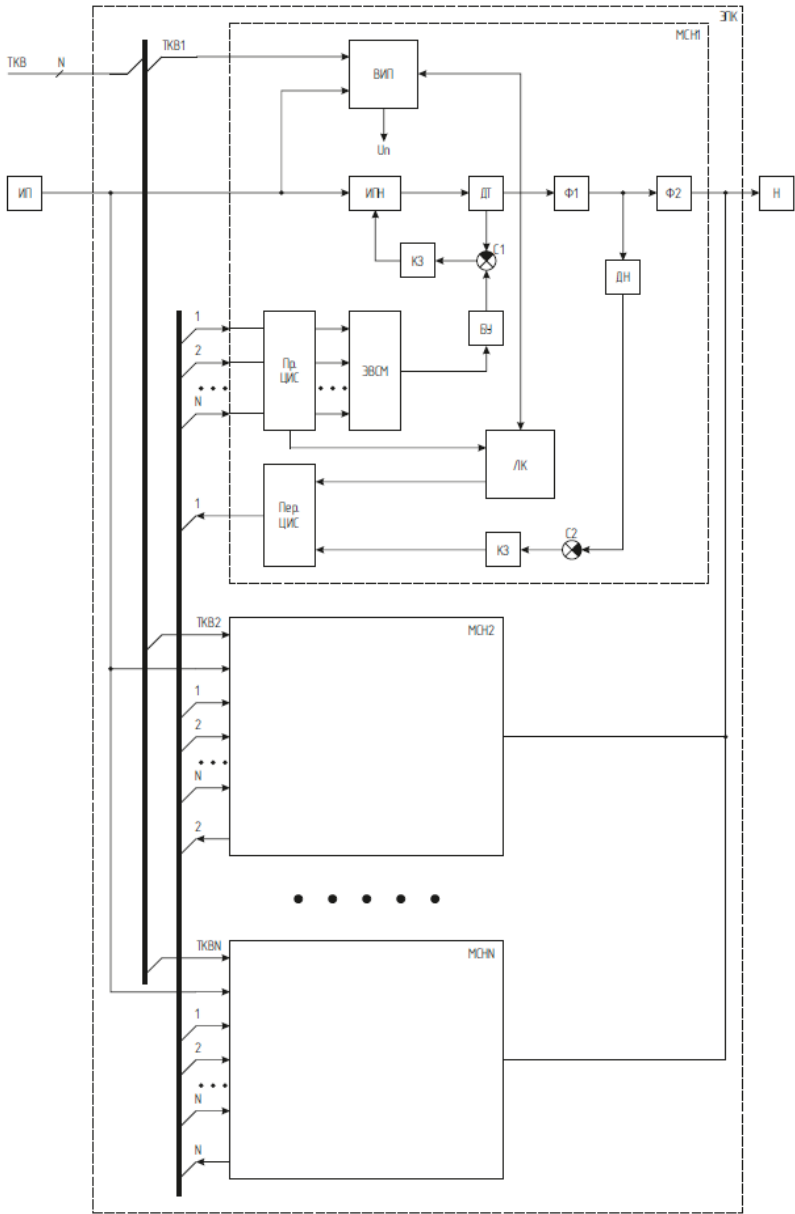


Рис. 1. Структурная схема СЭП, построенной по блочно-модульной архитектуре

Унифицированные модули получают информацию от каждого модуля в составе системы с помощью N -канального приемника и передатчика ЦИС. В случае отсутствия модуля в системе, его выхода из строя или его нахождения в состоянии ненагруженного резерва сигнал от соответствующего модуля не передается на остальные модули. Принятые i -м модулем от остальных модулей сигналы обрабатываются приемником ЦИС: СУВ по напряжению передается на ЭВСМ i -го модуля, а информация от ЛК каждого модуля передается на ЛК i -го модуля. Таким образом, каждый модуль имеет информацию о каждом модуле в составе системы, в том числе о времени наработки модулей. Это позволяет обеспечивать ротацию рабочих модулей между режимами работы и ненагруженного резервирования, что обеспечивает выравнивание наработки всех модулей.

ЭВСМ осуществляет выбор СУВ, используемого для управления ИПН, по медианному алгоритму. Так как в выборке из N сигналов СУВ может быть только один медианный сигнал, то все модули МСН в составе системы будут использовать один и тот же сигнал для управления своими ИПН. При этом сигналы вышедших из строя, но не отключенных МСН будут отличаться от сигналов не вышедших из строя модулей, поэтому такие сигналы не могут занимать медианное положение среди остальных сигналов и не будут использоваться для управления ИПН.

Кроме того, ЭВСМ обладает функцией исключения сигналов от отключенных, неработоспособных и резервных модулей. В связи с тем, что отключенные модули не отправляют данные на остальные модули, приемник ЦИС регистрирует отсутствие сигнала от i -го МСН и подает на i -й вход ЭВСМ сигнал, сигнализирующий о том, что сигнал СУВ данного модуля необходимо исключить из выборки медианного сигнала. Данная функция позволяет исключить из выборки любое количество модулей в составе системы. Это обеспечивает возможность сохранения работоспособности СЭП вплоть до отказа $N-1$ модулей МСН, а также перевода любого количества модулей в режим ненагруженного резервирования. Кроме того, эта функция позволяет использовать один и тот же IP-блок ЭВСМ для ПЛИС при реализации системы из любого количества модулей от 1 до N без внесения изменений в структуру IP-блока, что обеспечивает его универсальность.

Дальнейшим развитием данной работы является разработка алгоритма работы логического контроллера модуля стабилизации напряжения, реализующего описанную в данной работе возможность перевода модулей в режим ненагруженного резервирования, а также разработка и исследование имитационной модели системы, построенной по представленной в работе структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колосов В.А. СВЭП с повышенной надежностью для формирования промежуточных напряжений электропитания РЭА / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2009. – № 1. – С. 8–12.
2. Шарафутдинов В.Р. Анализ способов резервирования на основе модальной фильтрации / В.Р. Шарафутдинов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 3. – С. 117–144.
3. Гришин В.М. Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании / В.М. Гришин, П.М. Ко // Вестник Моск. авиационного ин-та. – 2009. – Т. 16, № 5. – С. 24–24.
4. Kabiroy V.A. et al. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Т. 48, No. 24. – P. 9057–9070.
5. Либенко Ю.Н. Специфические возможности систем вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, Г.Я. Михальченко, А.Н. Четин // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2-1 (24). – С. 264–268.

УДК 621.314.5

УПРАВЛЕНИЕ ОДНОКЛЮЧЕВЫМ ТРЕХФАЗНЫМ АКТИВНЫМ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

*П.А. Стрельников, аспирант; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, PASTr89@gmail.com*

Рассмотрен способ управления одноключевым трехфазным корректором коэффициента мощности, обеспечивающий повышение коэффициентов мощности при сравнительной простоте самого преобразователя и системы управления. Показаны преимущества и недостатки ККМ данного типа, определена область его эффективного применения.

Ключевые слова: одноключевой ККМ, корректор коэффициента мощности, управление ККМ.

Повсеместное применение полупроводниковых преобразователей приводит к прогрессирующему снижению качества потребляемой электроэнергии от промышленной сети различными нагрузками. В целях обеспечения качества питающей сети вопросы разработки преобразователей с встроенной коррекцией коэффициента мощности являются актуальными [1–3].

На рис. 1 представлена функциональная схема ККМ, на которой видно, что этот преобразователь по структуре является одноключевым, повышающим, с дросселями, которые расположены перед входным выпрямителем.

На рис. 2 показаны схемы замещения ККМ для трех рабочих интервалов, сформированных коммутациями вентилей преобразователя. Фазные токи на этих интервалах отражены на рис. 3 слева. Интервал времени, соответствующий схеме на рис. 2, *a*, обозначен длительностью импульса D_y , интервалы на рис. 2, *б*, *в* – длительностями D_{R1} и D_{R2} соответственно.

На рис. 3 справа показаны форма усредненного значения величины фазного тока в диапазоне от 0 до 180° и ее зависимость от M :

$$M = \frac{V_o}{\sqrt{3} \cdot V_{\max}}, \quad (1)$$

где V_o – выходное напряжение, V_{\max} – амплитуда фазного напряжения.

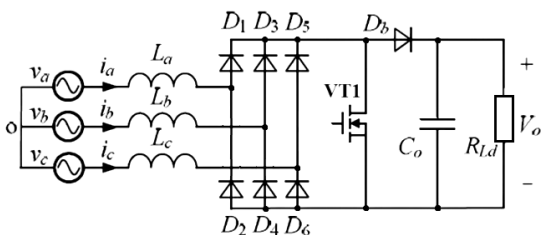


Рис. 1. Схема электрическая функциональная

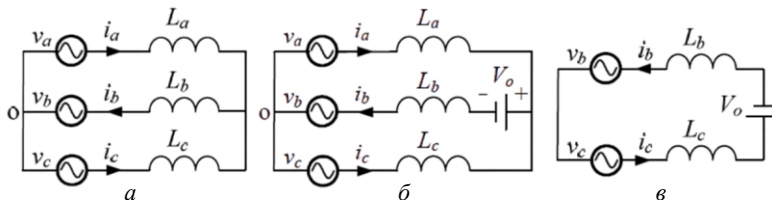


Рис. 2. Интервалы состояний преобразователя

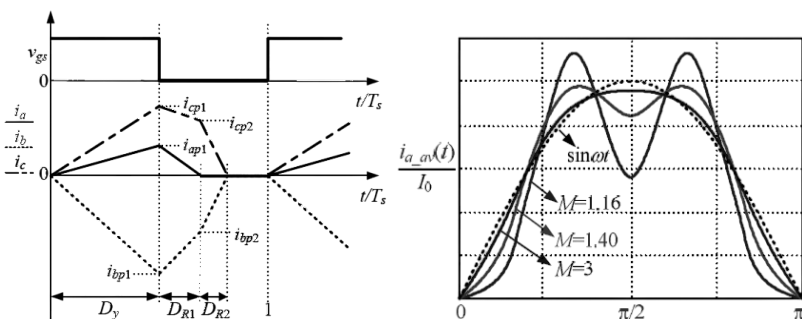


Рис. 3. Диаграмма фазных токов и зависимость формы тока от M

Из графика на рис. 3 справа видно, что с увеличением коэффициента M форма фазного тока стремится к синусоидальной. Однако, увеличение коэффициента M приводит к соответствующему увеличению напряжения, которое коммутируется транзистором VT1 и диодом D_b, что существенно затруднит техническую реализацию.

Исходя из анализа интервалов, приведенных на рис. 2, можно сформировать выражения (2):

$$\begin{aligned} di_a / dt &= (v_a - V_o / 3) / L, \\ di_b / dt &= (v_b + 2V_o / 3) / L, \\ di_c / dt &= (v_c - 2V_o / 3) / L. \end{aligned} \quad (2)$$

Анализ выражений (2) позволяет получить уравнение поправки для относительной длительности импульса (ОДИ) управляющего ключа, которая учитывает синусоидальность питающей сети. Введение этой поправки существенно повышает коэффициент мощности преобразователя при сравнительно невысоком значении M .

$$D_y = D_1 \left(1 - v_g / (2V_0 - \sqrt{3}V_m) \right), \quad (3)$$

где D_1 – ОДИ, полученная от корректирующего звена обратной связи, v_g – сигнал, пропорциональный 6-й гармонике питающей сети.

Повышение коэффициента мощности с помощью полученных поправок было проверено на имитационной модели, построенной в среде MatLab Simulink (рис. 4).

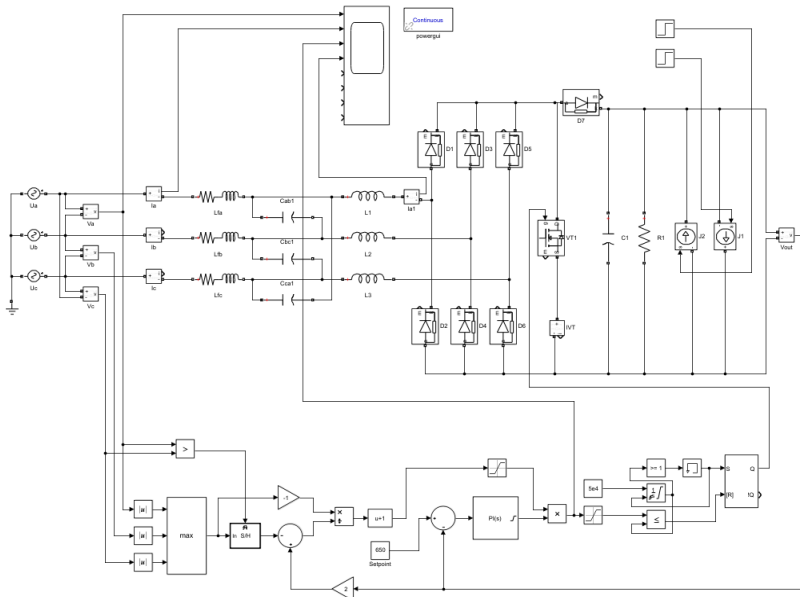


Рис. 4. Имитационная модель преобразователя

Из рис. 5 видно, что фазный ток (график 2) близок к синусоидальной форме, измеренный коэффициент фазного тока THD_i составил 10,5%, коэффициент мощности PF составил 99,4%.

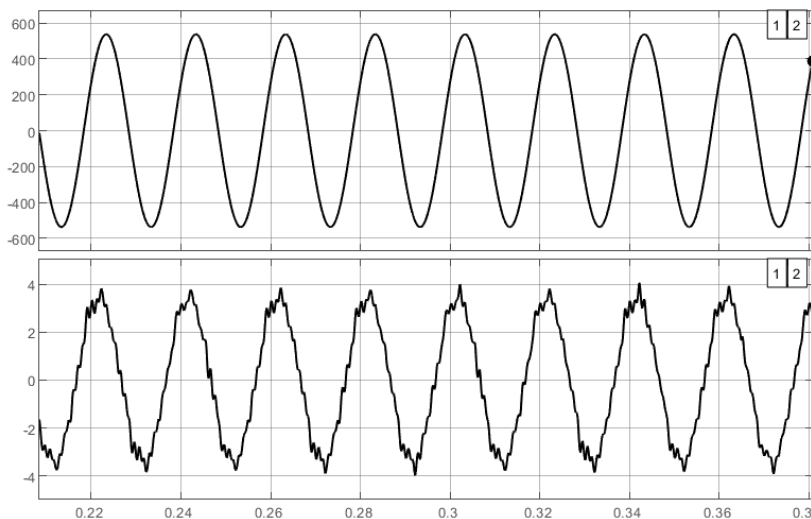


Рис. 5. Результаты моделирования

Полученные результаты имитационного моделирования подтвердили, что исследуемый преобразователь, управляемый по предложенному способу, действительно обладает высоким качеством потребляемой из сети энергии, достаточно прост в реализации и может быть эффективно использован в инженерной практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергетики / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
2. Чаплыгин Е.Е. Виенна-выпрямитель – трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника. – 2006. – Вып. 1. – С. 20–23.
3. Щагин А.В. Коррекция коэффициента мощности на IGBT-транзисторах в системе управления трехфазным выпрямителем // Известия вузов. Электроника. – 2013. – Вып. 3. – С. 82–87.

**УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ АУТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
СО СНИЖЕННЫМИ МАССОГАБАРИТНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

*Э.В. Ефремова, А.А. Арыстанбеков, Д.А. Товмасын, студенты
Научный руководитель В.И. Апасов, к.т.н., доцент каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, eleonorayefremova@mail.ru*

Рассматривается принцип работы устройства контроля силы тока в системе энергоснабжения космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, система энергоснабжения, телеметрия, устройство контроля, датчик тока.

Космический аппарат (КА) состоит из нескольких составных частей, прежде всего это целевая аппаратура, которая обеспечивает выполнение стоящей перед космическим аппаратом задачи. Помимо целевой аппаратуры обычно присутствует целый ряд служебных систем, которые обеспечивают длительное функционирование аппарата в условиях космического пространства.

В случае необходимости питания бортовых служебных систем (в том числе при управлении движением КА, обеспечении жизнедеятельности и терморегулировании, телеметрии и т. д.), система электроснабжения (СЭС) должна производить электроэнергию.

Система энергоснабжения и силовой электроники (СЭС) представляет собой сложную многофункциональную систему, тесно взаимосвязанную с космическим аппаратом (КА) и его подсистемами. Она является одной из ключевых систем, поскольку от ее исправной работы зависит активное функционирование КА. Обычно каждую систему энергоснабжения можно разделить на четыре основные составные части: а) источник энергии (включая запасы топлива и окислителя, тепловой генератор, солнечные батареи и др.); б) преобразователь энергии (механической, тепловой, солнечной или электрохимической) в электрическую энергию; в) система терморегулирования; г) электросиловая часть и система управления (включая электрические резервы, стабилизаторы напряжения, преобразователи и блоки автоматики). Важными системами контроля в космическом аппарате являются: 1) диагностики и самодиагностики; 2) автоматического управления; 3) телеметрии.

Телеметрия – это процесс сбора и передачи данных о различных параметрах, таких как температура, давление, скорость, угловые ско-

рости, энергопотребление и др., с использованием специальных датчиков, установленных на борту космического аппарата. Эти собранные данные передаются на Землю посредством радиосвязи. Система телеметрии играет важную роль в мониторинге и управлении космическим аппаратом в реальном времени, что позволяет операторам на Земле принимать быстрые и обоснованные решения для обеспечения безопасности и эффективности выполнения космической миссии.

Современное космическое приборостроение строится по стандартам CubeSat в определенном формате: 1U, 3U, 6U и т.д. Это было сделано для упрощения и стандартизации конструкции и размеров малых космических аппаратов. Использование стандартных размеров и интерфейсов упрощает процесс разработки, интеграции и запуска CubeSats, а также облегчает замену сломанных частей.

В рамках научно-исследовательской работы разрабатывается устройство контроля с датчиком тока, которое может быть применено в различных системах, упомянутых выше.

На рис. 1 приведена структурная схема устройства контроля силы тока, отличительной особенностью которой является изготовление наличие гальванической развязки.

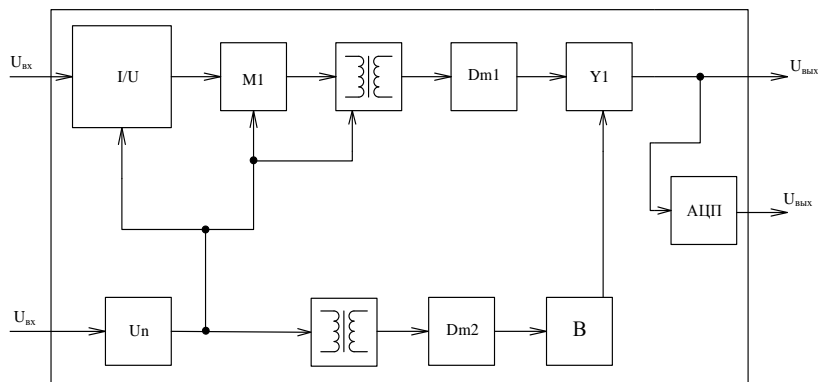


Рис. 1. Структурная схема

Рассматривается принцип работы разрабатываемого устройства, где особое внимание уделяется блоку контроля силы тока. Для обеспечения точных измерений силы тока с минимальной погрешностью при умеренной стоимости выбран трансформатор (П1). Его высокая надежность полностью соответствует требованиям проекта. В качестве альтернативы рассматривался пояс Роговского, однако его чувствительность ниже из-за отсутствия сердечников с высоким намагничиванием.

Поскольку в качестве П1 используется трансформатор, то при повышении силы тока измеряемого объекта возникает соответственно повышение напряжения. Далее это напряжение поступает на усилитель У1, затем переменное напряжение подается на модулятор М1, после чего передается в выходную часть посредством трансформатора ТР1 и демодулятор ν , выделяющий измеряемый сигнал. Далее он поступает на усилитель У2 и на аналоговый выход устройства, а с помощью АЦП – на цифровой выход. Напряжение нагрузки U_n поступает на модулятор М2, трансформатор ТР2 и выпрямитель В.

Таким образом, разрабатываемое устройство позволяет производить измерения силы тока СЭС и передавать их в бортовой комплекс управления КА.

На следующих этапах исследования планируется разработать электрическую схему устройства контроля силы тока для автономных систем электропитания с уменьшенными габаритно-массовыми характеристиками, предназначенного для применения в аэрокосмической технике. Кроме того, будут созданы имитационная модель и экспериментальный образец данного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
2. Казанцев Ю.М. Токовый преобразователь энергии солнечной батареи в системе электропитания космических аппаратов / Ю.М. Казанцев, К.Г. Гордеев, А.Ф. Лекарев, С.П. Черданцев, А.М. Гаврилов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2011. – Т. 319, № 4. – С. 148–153.
3. Система электропитания космического аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/270/2704656.html> (дата обращения: 07.03.2024).

УДК 621.314.1

ЦЕПИ КОРРЕКЦИИ В КОНТУРЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

*П.Е. Канаков, магистрант; Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru*

Рассмотрены варианты цепей, применяемых в контуре обратной связи импульсных источников питания для коррекции частотных характеристик.

Ключевые слова: компенсация обратной связи, нули компенсации, полюса компенсации, интегратор.

Корректирующие цепи в контуре обратной связи направлены на обеспечение устойчивости замкнутой системы. Создание устойчивости происходит с помощью формирования запасов по фазе и усилению. Запас по фазе – это разница между 180 эл. град и фазовым сдвигом, при котором величина передаточной функции контура равна 0 дБ. Запас по усилению – это разница между 0 дБ и величиной передаточной функции контура на частоте, где сдвиг фазы равен 180 эл. град. Размещение полюсов и нулей цепи коррекции используется для создания необходимых запасов.

Целью работы является сравнительный анализ разных типов цепей коррекции для использования в импульсных источниках питания. По количеству нулей и полюсов существует три типа цепей коррекции в контуре обратной связи.

1. Данный тип является самым простым, который содержит только интегратор. Передаточная функция имеет вид

$$H_C(s) = \frac{\omega_1}{s}, \quad (1)$$

где ω_1 – коэффициент передачи интегратора.

Первый тип используется в преобразователях с низким быстродействием. Причиной тому является то, что частота усиления ограничена ниже полюса передаточной функции, цепь коррекции показана на рис. 1.

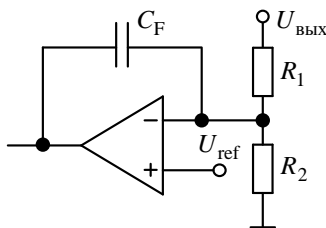


Рис. 1. Цепь коррекции первого типа

2. Данный тип компенсации содержит интегратор, один ноль и один полюс, как показано на рис. 2.

$$H_C(s) = \omega_1 \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_{CZ1}}}{s \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{CP1}}\right)}, \quad (2)$$

где ω_1 – коэффициент передачи интегратора; ω_{CZ1} – ноль компенсации; ω_{CP1} – полюс компенсации.

Компенсация второго типа формирует максимальный запас по фазе 90 эл. град с частотой единичного усиления, которая выше полюса усилителя мощности. Ноль используется, чтобы компенсировать падение фазы из-за интегратора, а полюс используется для ослабления пульсации переключения. Цепь коррекции показана на рис. 2.

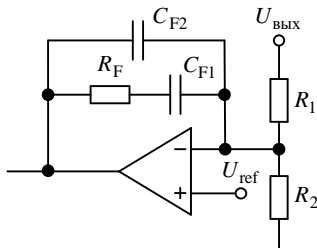


Рис. 2. Цепь коррекции второго типа

В третьем типе к типу 2 добавляются еще по одному полюсу и полюсу.

$$H_C(s) = \frac{\omega_1}{s} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{CZ1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{CZ2}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{CP1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{CP2}}\right)}, \quad (3)$$

где ω_1 – коэффициент передачи интегратора; $\omega_{CZ1}, \omega_{CZ2}$ – нули компенсации; $\omega_{CP1}, \omega_{CP2}$ – полюса компенсации.

Третий тип используется для двухполюсной передаточной функции, где компенсация обеспечивает максимальный запас по фазе 90 эл. град. с частотой единичного усиления выше, чем у двойного полюса, как показано на рис. 3.

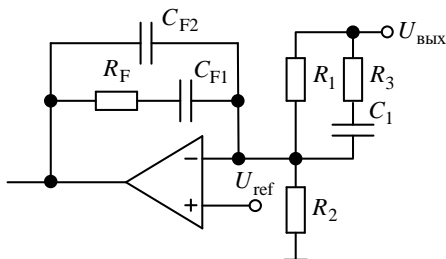


Рис. 3. Цепь коррекции третьего типа

Представленный сравнительный анализ позволяет сделать вывод: выбор цепи коррекции зависит от частоты преобразования параметров

электрической энергии. Цепь коррекции первого типа рекомендуется применять в низкочастотных импульсных преобразователях. В высокочастотных импульсных преобразователях необходимо применение цепей коррекции второго или третьего типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sheehan R., Diana L. Switch-mode power converter compensation made easy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://valvolodin.narod.ru/articles/slup340_ru.pdf

УДК 621.314.1

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

*П.Е. Канаков, магистрант; Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru*

Рассмотрены влияние паразитных параметров проводников на выходные параметры преобразователя постоянного напряжения, а также способ их уменьшения.

Ключевые слова: паразитные параметры, фильтры, PoL-преобразователи, пульсации выходного напряжения.

Одним из направлений в развитии микроэлектроники является повышение рабочей частоты. Данное решение позволяет уменьшать массогабаритные характеристики устройства. Однако чем выше частота, тем больше происходит влияние паразитных параметров проводников, такие как паразитные индуктивности и ёмкости, на выходные характеристики электротехнического устройства.

Целью данной работы является анализ влияния паразитных параметров на пульсации выходного напряжения.

Одним из главных требований к источникам питания являются малые пульсации выходного напряжения. Одним из простых и достаточно эффективных способов уменьшения пульсаций напряжения на выходе преобразователей является применение на входе и выходе преобразователя сглаживающих фильтров. Однако конструктивные и схемотехнические решения этого класса фильтров не столь тривиальны, как может показаться [1].

Самыми простыми фильтрами является фильтрующие конденсаторы, лучшим вариантом которых является связка керамического конденсатора с малой ёмкостью и танталового с большой ёмкостью и низким последовательным сопротивлением (ESR). Однако простого использования фильтрующих конденсаторов недостаточно для их

правильной работы, необходима и правильная их расстановка на плате.

На рис. 1 представлена осциллограмма пульсаций выходных напряжений при отдаленном положении выходных конденсаторов от микросхемы (длина проводника 40 мм), а на рис. 2 – осциллограмма пульсаций выходных напряжений при непосредственной близости выходных конденсаторов к микросхеме (длина проводника 10 мм).

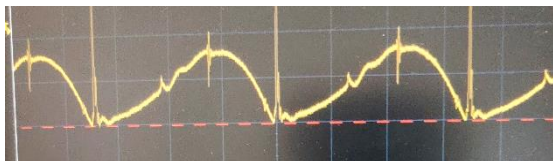


Рис. 1. Пульсации выходного напряжения при отдаленном положении выходных конденсаторов от микросхемы

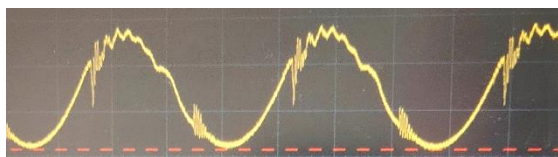


Рис. 2. Пульсации выходного напряжения при непосредственной близости выходных конденсаторов к микросхеме

Из временных диаграмм, представленных на рис. 1 и 2, следует: при отдаленном расположении выходных конденсаторов размах пульсаций составляет 1 В при выходном напряжении 5 В; при непосредственной близости выходных конденсаторов размах пульсаций составляет 40 мВ.

Таким образом, увеличенное расстояние приводит к повышению высокочастотных помех из-за увеличения длины проводника, связующего данные элементы. Данный пример показывает влияние паразитных параметров на пульсации выходного напряжения. Поэтому, чтобы паразитные параметры минимально влияли, высокочастотные преобразователи напряжения, используемые в системах электропитания, имеют особенность компоновки в виде максимальной близости фильтрующих конденсаторов и диодов к микросхеме и нагрузке, что позволяет уменьшить массогабаритные показатели прежде всего за счет сглаживающих фильтров на входе и выходе. Данный тип преобразователей в англоязычной литературе получил название Point of Load (близкий к нагрузке). Архитектура распределенной системы электропитания с использованием силовых модулей на базе PoL-преобразователей используется для питания бортовой авиационной и ракетно-космической аппаратуры.

На схемах электрических принципиальных близость элементов показана в виде соединения под углом 45°, как показано на рис. 3.

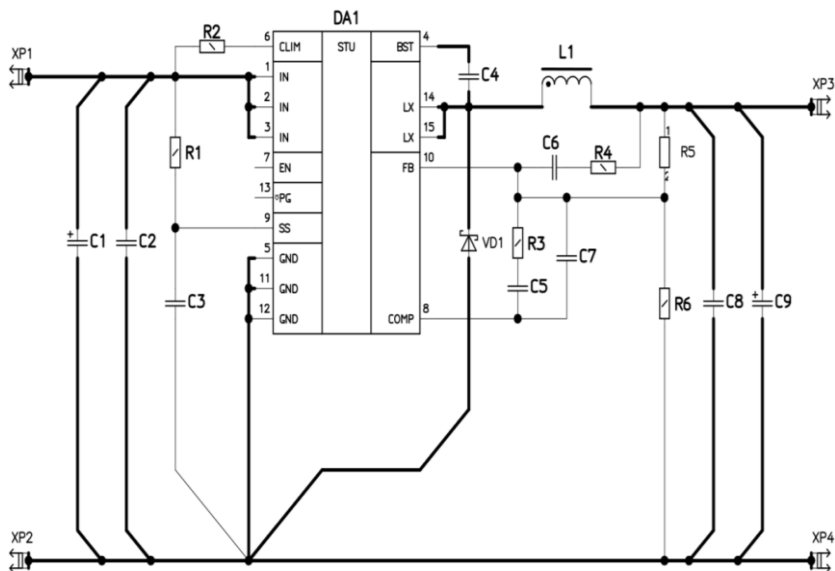


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная PoL-преобразователя

Вывод. При высокой рабочей частоте преобразователя из-за паразитных параметров проводников выходные параметры становятся более чувствительными к изменению внутренних параметров. Чтобы минимизировать их влияние, необходимо разработать не только правильные фильтры, но и делать длину проводников, соединяющих как элементы преобразователя, так и преобразователь с нагрузкой, минимальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стив Р. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация / Р. Стив, С. Робертс, В. Рентюк // Компоненты и технологии. Проектирование. – 2015. – № 8. – С. 74–85.
2. Жданкин В. Низковольтные DC/DC-преобразователи типа POL для бортовой авиационной и ракетно-космической аппаратуры // Силовая электроника. – 2011. – № 2. – С. 37–42.

**КОМПЛЕКС ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ
ДЛЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА
И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ГАЗА**

*И.П. Киселев, магистрант; Н.С. Лезостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, lns@ie.tusur.ru*

Представлена схема электрическая структурная комплекса измерительно-вычислительного для систем измерения количества и качества газа, обоснована необходимость применения для микроконтроллера внешнего 12-битного АЦП.

Ключевые слова: ИВК, СИКГ, АЦП, расход газа, погрешность.

В нефтегазовой промышленности широкое применение нашли системы измерения количества и качественных показателей газа (СИКГ). Данные системы представляет собой комплекс инженерных и технических решений, разработанных для точного и надежного определения расхода (объемного и массового) газа, а также его качественных характеристик, включающих в себя компонентный состав измеряемого газа.

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) в составе СИКГ представляет собой автоматизированный аппаратно-программный комплекс, предназначенный для измерений количества и показателей качества газа путём присоединения к входу измерительных каналов ИВК измерительных устройств с унифицированным электрическим выходным сигналом и генерации программ обработки информации на основе программных компонентов ИВК [1].

Разработка и внедрение ИВК являются актуальной задачей. Статья направлена на формирование ИВК с целью сбора и обработки информации с повышенной точностью.

Условия, при которых происходит измерение параметров газа в СИКГ, называются рабочими. Так как изменения температуры и давления газа приводят к изменению его объема при неизменности количества его частиц, объем и расход газа при рабочих условиях не может использоваться при взаимных расчётах между организациями. По этой причине объем и расход газа при коммерческом учёте приводится к стандартным условиям, установленным ГОСТ 2939-63 «Газы. Условия для определения объема» [2].

Основная функция ИВК в составе СИКГ – расчёт коэффициента сжимаемости и последующее приведение объемного расхода газа и его плотности к стандартным условиям на основе информации, полученной от измерительных датчиков.

Схема электрическая структурная комплекса представлена на рис. 1. Через цифровой интерфейс данный комплекс может быть подключен к АРМ оператора. Тогда любое взаимодействие с данными устройства можно будет производить на расстоянии.

В состав комплекса входят следующие функциональные блоки:

– Блок искрозащиты служит барьером между искробезопасными (цепи датчиков) и искроопасными (цепи ИВК) электрическими цепями.

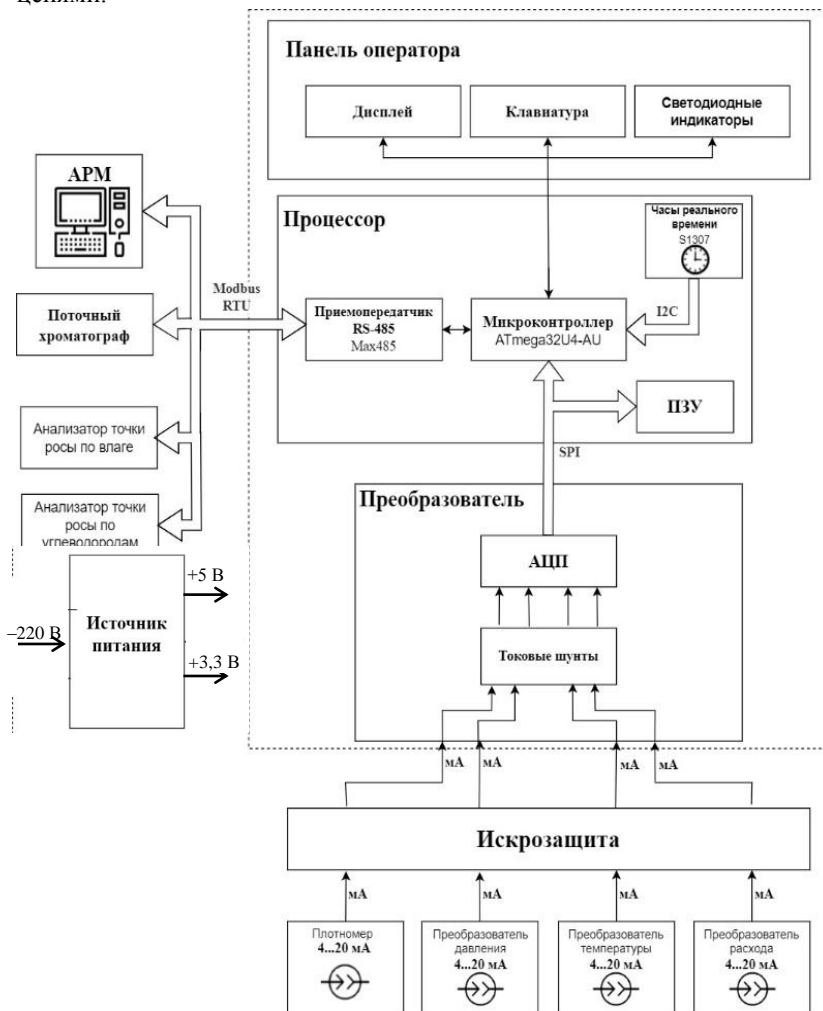


Рис. 1. Схема электрическая структурная ИВК

– *Преобразовательный блок*. В нем происходит преобразование входных сигналов в понятный процессорному блоку вид посредством аналого-цифрового преобразования.

– *Процессорный блок* отвечает за обработку данных, собранных с измерительных устройств, находящихся в составе СИКГ, и последующий расчёт параметров, приведённых к стандартным условиям. В данном блоке также происходит хранение учётных параметров. Основной блока служит микроконтроллер ATmega 32U4-AU.

– *Панель оператора* отвечает за взаимодействие с оперативным персоналом. Включает в себя дисплей, светодиодные индикаторы и клавиатуру для конфигурирования и мониторинга работы прибора.

– *Источник питания* осуществляет питание преобразовательного и процессорного блоков, а также панели оператора в составе комплекса измерительно-вычислительного.

ИВК в составе СИКГ проводит измерения и последующие вычисления с использованием измеренных данных, к которым относится и основной учётный параметр – расход газа. В связи с этим к данному устройству применимы стандарты СТО Газпром. Так, например, согласно стандарту СТО Газпром 5.2–2005 погрешность измерений не должна превышать $\pm 0,05\%$ [3].

Для выполнения данного требования при измерении унифицированного сигнала с измерительных датчиков необходимо использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с достаточной разрядностью, которая зависит от количества уровней квантования.

Так, точность преобразования (квантования) обычно задается в виде значения приведенной относительной погрешности [4]

$$\delta_{\text{к.у.}} = \frac{100 \cdot q}{2 \cdot (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})}, \quad (1)$$

где λ_{max} – максимальное значение измеряемого диапазона; λ_{min} – минимальное значение измеряемого диапазона; q – интервал между двумя дискретными значениями уровней, называемый шагом квантования.

Из выражения (1) получается следующая формула для нахождения шага квантования:

$$q = \frac{2(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}})\delta_{\text{к.у.}}}{100} \quad (2)$$

При этом число уровней квантования N [4]

$$N = \frac{100}{2\delta_{\text{к.у.}}} + 1. \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) значение приведенной погрешности, указанное в СТО Газпром 5.2–2005 «Расход и количество природного газа», получается следующее число необходимых уровней квантования:

$$N = \frac{100}{2 \cdot 0,05} + 1 = 1001. \quad (4)$$

Внутренний АЦП микроконтроллера AtMega32 имеет 10-битную разрядность (1 024 уровня квантования сигнала). С целью повышения точности ИВК предлагается для микроконтроллера ATmega32U4-AU использовать внешний 12-битный АЦП, например ADS7824P.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парахуда Р.Н. Информационно-измерительные системы: письменные лекции / Р.Н. Парахуда, Б.Я. Литвинов. – СПб.: СЗТУ, 2002. – 74 с.
2. ГОСТ 2939–63. Газы. Условия для определения объема. – Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/db1/4294847343.pdf>, свободный (дата обращения: 10.02.2024).
3. СТО Газпром 5.2–2005. Расход и количество природного газа. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода. – Режим доступа: <https://snip.ruscable.ru/Data1/54/54556/index.html>, свободный (дата обращения: 10.02.2024).
4. Квантование по уровню. Студопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.su/9_108031_kvantovanie-po-urovnyu.html, свободный (дата обращения: 10.02.2024).

УДК 621.314.632

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

*В.С. Коробкова, студентка; Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vichka_korobkova@bk.ru*

Излагаются результаты имитационного моделирования автономной ветроэнергетической установки.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, имитационная модель, мощность, переменный ток, постоянный ток, электромагнитные процессы, энергетические показатели, зависимость.

Исследование импульсных преобразователей электрической энергии в составе автономной ветроэнергетической установки это актуальная тенденция для современного развития страны. Так как в

основном установки применяются в системах автономного питания метеорологических, научно-исследовательских и геологоразведочных станций, резервного питания объектов Министерства по гражданской обороне и чрезвычайным ситуациям, обеспечивают энергетическую безопасность населенных пунктов с децентрализованным энергосбережением. Целью данной статьи является обеспечение исследований электромагнитных процессов в автономной ветроэнергетической установке.

В рамках исследования модели проанализировано программное обеспечение, позволяющее воспроизвести подобный энергокомплекс. Вследствие обеспечения высокой гибкости при взаимодействии отдельных компонентов системы электроснабжения была выбрана программная среда MatLab Simulink [1]. Реализованная имитационная модель автономной ветроэнергетической установки представлена на рис. 1.

Для обеспечения работы ветроэнергетической установки в состав имитационной модели входят следующие основные компоненты: ветродвигатель (Wind Turbine), генератор переменного тока (Permanent Magnet Synchronous Machine), выпрямитель (Rectifier1), автономный инвертор (PWM IGBT Inverter), зарядное устройство (Lithium Battery Charger), аккумуляторные батареи (Battery), нагрузка (Load Demand).

Конфигурация соединения элементов имитационной модели на основе диодно-выпрямительного моста (Rectifier1) и инвертора (PWM IGBT Inverter), представленная на рис. 2, позволяет преобразовать напряжение, полученное при скорости 6 м/с.

Автономный трехфазовый инвертор напряжения преобразует выходное напряжение фильтра выпрямителя в сигнал синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), представленный на рис. 3.

Для получения синусоидального напряжения (рис. 4, б) применен фильтр, реализованный изменением блока Load Demand. В состав фильтра входит индуктивность дросселя и емкости конденсатора, схема приведена на рис. 4, а.

Для хранения избыточной электроэнергии, которая генерируется ветроэнергетической установкой, в состав имитационной модели установки входят зарядное устройство (Lithium Battery Charger) и аккумуляторные батареи (Battery). Такая комбинация компонентов позволяет запастись избыточной энергией, вырабатываемую ветроэнергетической установкой, в периоды ее низкого потребления нагрузки. Напряжение и ток аккумуляторной батареи приведены на рис. 5, а и б.

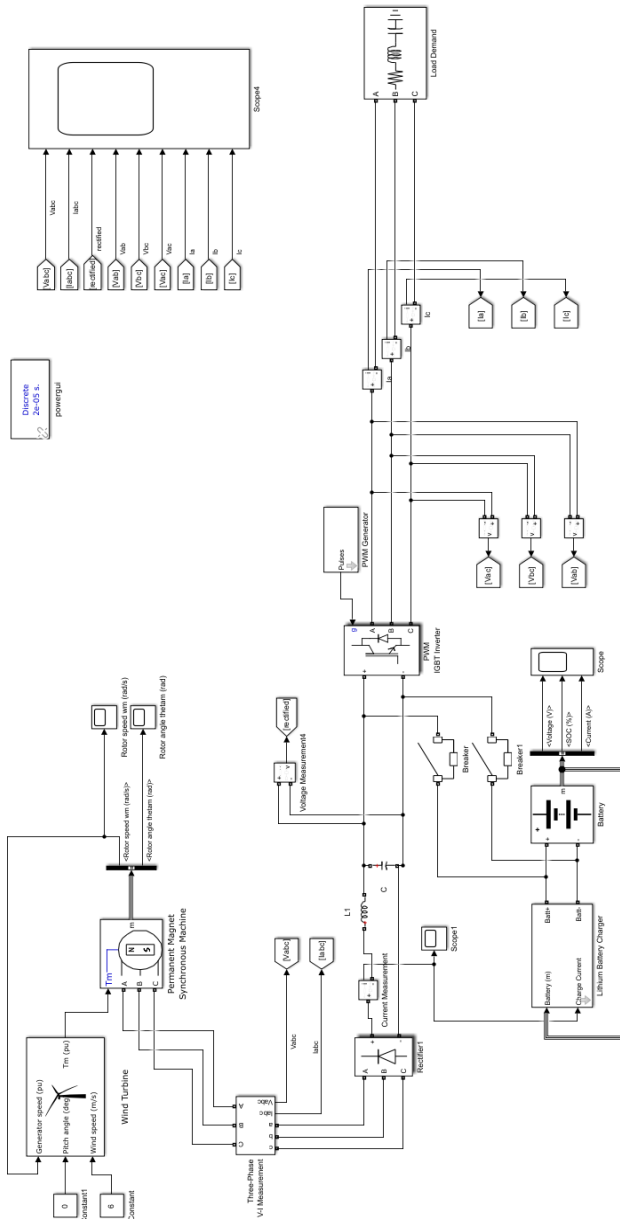


Рис. 1. Имитационная модель автономной ветроэнергетической установки мощностью 150 кВт

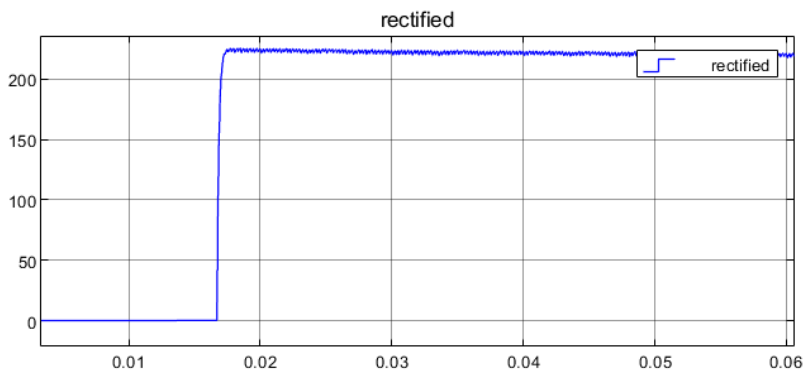


Рис. 2. Выпрямленное напряжение

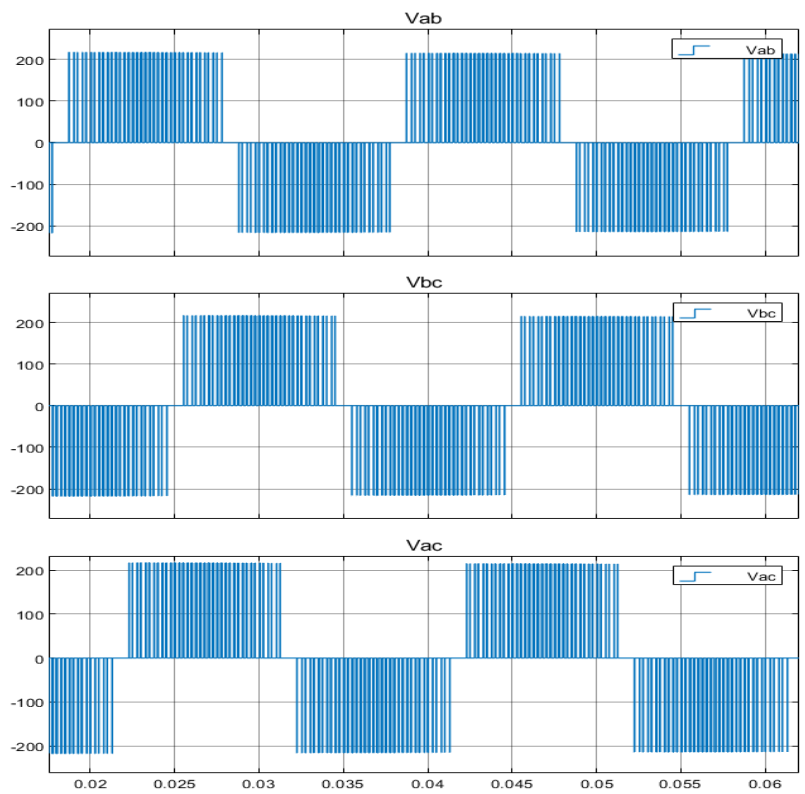
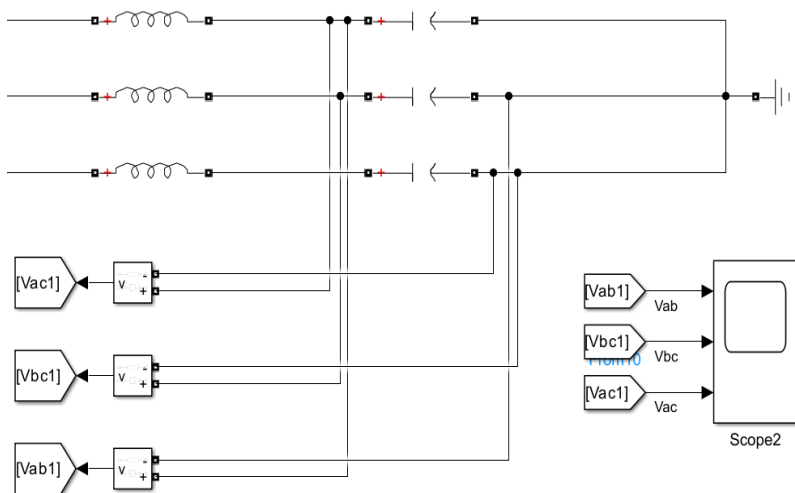
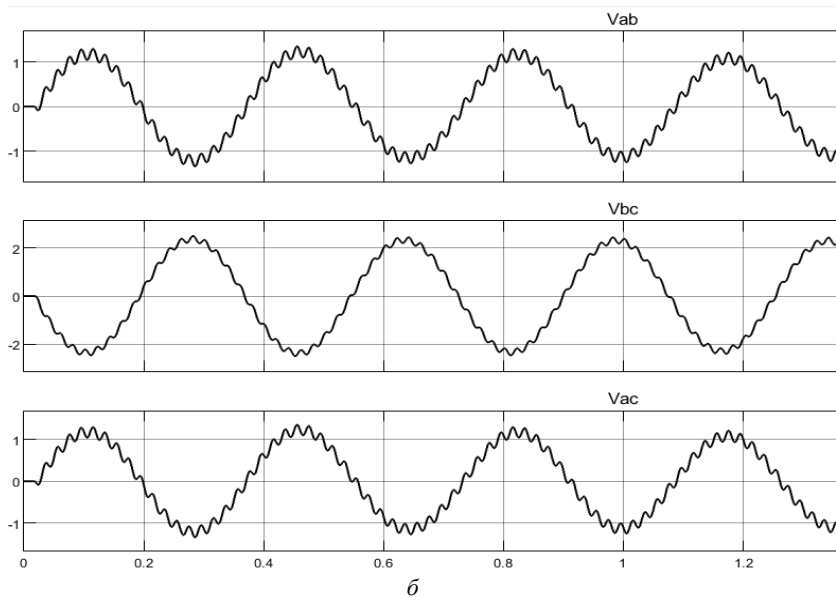


Рис. 3. Форма выходного напряжения трехфазного PWM IGBT Inverter в режиме ШИМ



a



б

Рис. 4. Выходной фильтр (*a*),
временные диаграммы линейных напряжений после фильтрации (*б*)

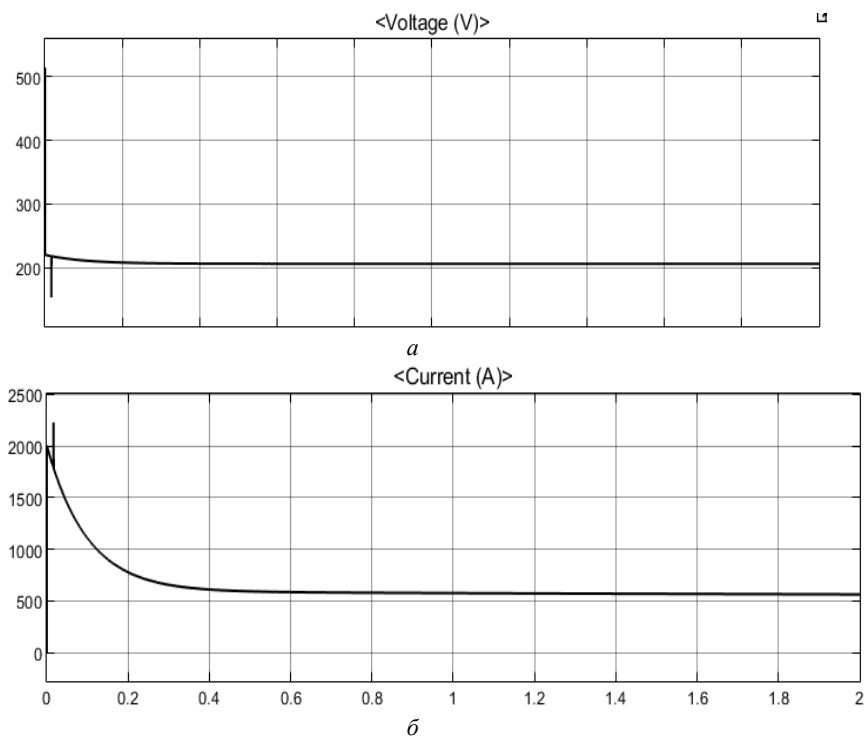


Рис. 5. Номинальное напряжение (*a*) и ток (*б*) аккумуляторной батареи в процессе разряда

Представленная имитационная модель автономной ветроэнергетической установки в среде MathLab Simulink обеспечивает исследование электромагнитных процессов и энергетических показателей ее отдельных узлов и компонентов на более детализированном уровне схем электрических принципиальных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Имитационное моделирование ветроэнергетической установки в программе MatLab Simulink / Е.М. Гордиевский, А.А. Мирошниченко, А.З. Кулганатов, Е.В. Соломин, В.И. Станчаускас // Изв. высш. учеб. завед.: Северо-Кавказский регион. – 2020. – Вып. 1. – С. 25–32.
2. Джабер Д.А.И. Автономный преобразователь энергии ветра на базе бесконтактной машины постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб., 2022. – 160 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХПОРТОВОГО РЕЗОНАНСНОГО LLC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А. Нурханов, аспирант; М.М. Поддубный, студент каф. ПрЭ;

Д.Е. Корчагин, магистрант НИ ТПУ

Научный руководитель А.В. Осипов, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, abilkayr.nurkhan@mail.ru

Рассматривается трехпортовый преобразователь, который представляет собой объединенный сетевой и аккумуляторный каналы вторичного источника электропитания (ИВЭП) с общим выходом. Построена имитационная модель трехпортового преобразователя напряжения в среде LtSpice.

Ключевые слова: LLC-преобразователь, резонансный контур, источники питания, трехпортовый преобразователь.

Актуальность применения трехпортового преобразователя заключается в снижении габаритов системы электропитания (СЭП), за счет объединения выходного канала, в этом случае в структуре присутствует один трехобмоточный силовой трансформатор и один выходной инвертор.

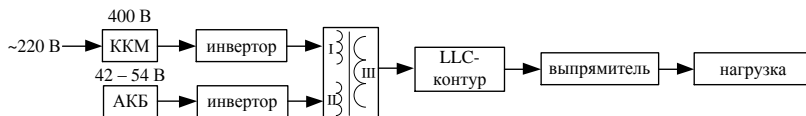


Рис. 1. Трехпортовый резонансный преобразователь

В большинстве СЭП напряжение сетевого инвертора фиксировано и находится на уровне $U_{вх} = 400$ В, определяемом корректором коэффициента мощности, а напряжение аккумуляторной батареи (АБ) изменяется в некотором диапазоне. Таким образом, напряжение вторичной обмотки трансформатора зависит только от уровня заряда АБ. Это позволяет обойтись одним резонансным контуром, расположенным во вторичной обмотке, и применять частотное регулирование. При работе от сети трансформатор формирует на обмотке аккумуляторного инвертора напряжение, которое в общем случае может превышать напряжение АБ, что приведет к нарушению допустимого режима работы. Поэтому коэффициент трансформации $K_{тр(вх-АБ)}$ необходимо рассчитывать из условия $U_{вх} \cdot K_{тр(вх-АБ)}$, что обеспечивает работу при минимальном напряжении АБ, т.е. $U_{АБ \min}$. Тогда коэффициент трансформации между первичной обмоткой сети и выходной обмоткой определится из следующих соотношений:

$$K_{\text{тр(АБ-ВЫХ)}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{АБ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.маx}}}{U_{\text{АБ маx}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.миn}}}{U_{\text{АБ миn}}}; K_{\text{тр(ВХ-АБ)}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{АБ миn}}},$$

поэтому $K_{\text{тр ВХ-ВЫХ}} = \frac{K_{\text{тр ВХ}}}{K_{\text{тр АБ}}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{АБ миn}}} \cdot \frac{U_{\text{АБ миn}}}{U_{\text{ВЫХ.миn}}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ.миn}}}.$

Имитационная модель трехпортового преобразователя напряжения в среде LtSpice представлена на рис. 2.

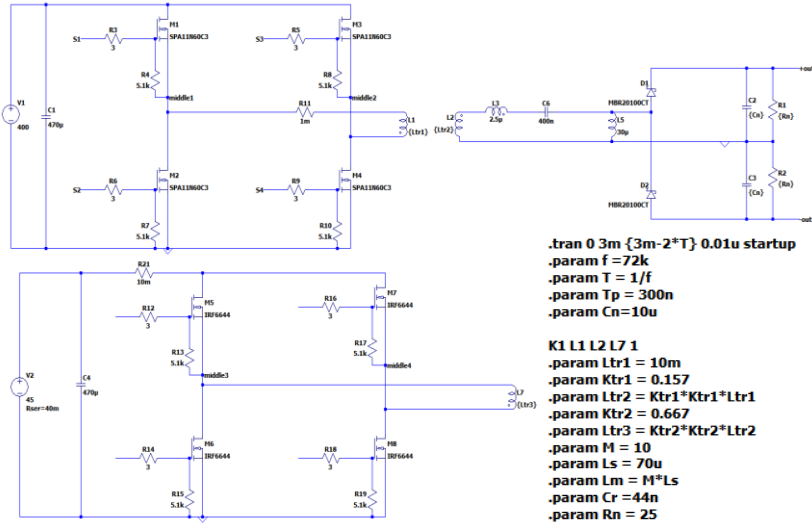


Рис. 2. Имитационная модель трехпортового преобразователя

Напряжение аккумуляторного инвертора находится в диапазоне $U_{\text{АБ}} = [42-54 \text{ В}]$, а в режиме работы трехпортового преобразователя от сети на аккумуляторной обмотке формируется напряжение 41,65 В, т.е. меньше величины $U_{\text{АБ миn}}$, результаты показаны на рис. 3. К транзисторам прикладывается обратное напряжение, тогда диоды транзисторов заперты и ток в данной обмотке не протекает. Следовательно, заряд АБ не происходит. Величина выходного напряжения 170 В свидетельствует о правильности работы LLC-контура и сохранении необходимых регулировочных характеристик.

Рассмотренная схема трехпортового преобразователя включает один резонансный контур, сохраняя при этом необходимые регулировочные характеристики. Выбор коэффициента трансформации согласно описанному способу позволяет при работе преобразователя от сети исключить аварийные ситуации.

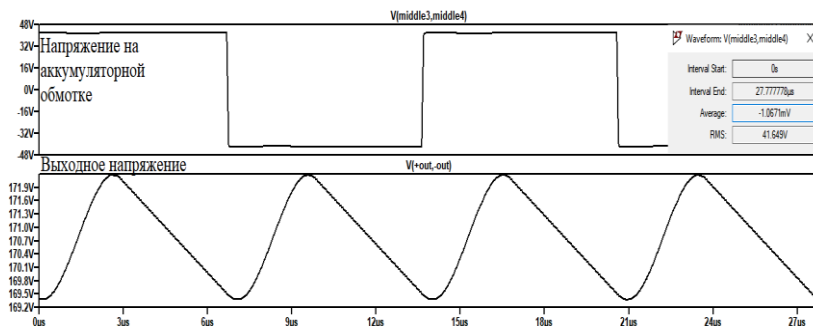


Рис. 3. Диаграммы работы трехпортового преобразователя

ЛИТЕРАТУРА

1. Analysis, Design, Modelling and Control of an Interleaved-Boost Full-Bridge Three-Port Converter for Hybrid Renewable Energy Systems / M.C. Mira, Zhe Zhang, A. Knott, M.A.E. Andersen // IEEE Transactions on Power Electronics. – Feb. 2017. – Vol. 32, No. 2, – P. 1138–1155.
2. Луков, Д.Ю. Двухнаправленный трехпортовый высокочастотный DC-DC-конвертор / Д.Ю. Луков, Ю.М Голембиовский, М.Г. Коваль // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 100–105.

УДК 621.316

МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

М.Г. Тимошенко, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель Ю.А. Кремзуков, зав. отд.

«НИИ АЭМ ТУСУР», к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, makstimoshenko15@gmail.com

Представлены описание и структурная схема модуля контроля и управления, выполняющего функции измерения параметров и управления режимом работы аккумуляторной батареи в составе энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) космического аппарата.

Ключевые слова: литий-ионная аккумуляторная батарея, контроль параметров, управление, космический аппарат.

На сегодняшний день применение аккумуляторных батарей на основе литий-ионных аккумуляторных элементов стало общепринятой практикой в отрасли космической промышленности. Литий-ионные аккумуляторные элементы обладают высокой удельной энергоёмкостью, низким внутренним сопротивлением, низким временем заряда и током саморазряда по сравнению с никель-кадмиевыми и

никель-металлогидридными аккумуляторными элементами [1]. Однако литий-ионные аккумуляторные элементы требуют строгого соблюдения условий эксплуатации. Перегрев или перезаряд аккумуляторного элемента провоцирует протекание химических реакций, приводящих к выходу из строя и тепловому пробою [2].

Каждый аккумуляторный элемент в составе аккумуляторной батареи имеет собственные значения внутреннего сопротивления, тока саморазряда, скорости деградации материалов. Вследствие этого при равном токе заряда к концу зарядного цикла возникает разность напряжений между самым заряженным и самым разряженным элементом, называемая разбалансом. Постоянно увеличивающийся разбаланс приводит к уменьшению емкости аккумуляторной батареи, следовательно, и к уменьшению срока службы.

Система электроснабжения является одной из важнейших бортовых систем, в основном определяющей технический ресурс космического аппарата [3], поэтому проблема соблюдения условий эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи имеет первостепенное значение [4].

Модуль контроля и управления предназначен для повышения надежности и продления срока службы литий-ионной аккумуляторной батареи и обеспечивает следующие функции:

- контроль напряжения и температуры аккумуляторных элементов и аккумуляторной батареи;
- обработка и передача контролируемых параметров в энергопреобразующую аппаратуру космического аппарата;
- управление режимом работы аккумуляторной батареи (включение и отключение режимов заряда, разряда, балансировки).

Модуль контроля и управления (МКУ), представленный на рис. 1, разделен на три функциональных блока:

1. Блок модулей управления (БМУ).
2. Блок модулей измерения (БМИ).
3. Блок устройств вторичного электропитания и балансировки (БУВЭБ).

БМУ состоит из двух идентичных пар, включающих в себя модуль управления (МУ) и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). МУ обеспечивает информационную связь с энергопреобразующей аппаратурой по мультиплексному каналу передачи данных и управление модулями из состава других блоков с целью контроля параметров и проведения процедур заряда, балансировки и байпасирования аккумуляторной батареи. ПЗУ содержит исполняемую программу и калибровочные коэффициенты модулей измерения.

БМИ состоит из двух идентичных модулей измерения напряжения (МИН) и двух идентичных модулей измерения температуры (МИТ), которые обеспечивают поочередный выбор датчиков измерения напряжения и температуры, преобразование аналогового сигнала измерения в 16-разрядный код и передачу его в БМУ.

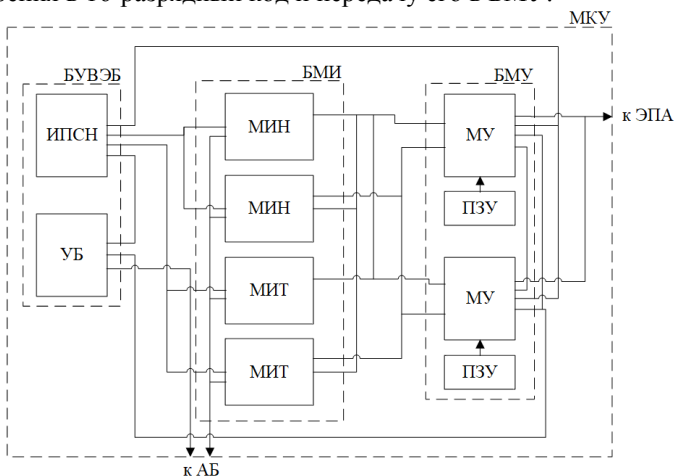


Рис. 1. Структурная схема модуля контроля и управления

Блок устройств вторичного электропитания и балансировки (БУВЭБ) состоит из источника питания собственных нужд (ИПСН), который обеспечивает гальваническую развязку и формирует необходимые питающие напряжения для всех модулей МКУ, и устройства балансировки (УБ), которое обеспечивает балансирование напряжений аккумуляторных элементов пассивным методом по определенному алгоритму. Пассивный метод балансировки заключается в том, что самый заряженный аккумуляторный элемент коммутируется с балластным резистором и разряжается до достижения требуемой разности напряжений.

Требования надежности обеспечиваются резервированием модулей, их составных частей и линий коммуникации. В модуле контроля и управления применяются два вида резерва – нагруженный и ненагруженный. В нагруженном резерве работают модуль управления МУ, модуль измерения напряжения МИН, модуль измерения температуры МИТ, канал передачи измерений, канал связи с ЭПА и фидер питания. В ненагруженном резерве находятся коммутационные ячейки устройства балансировки.

Описанное устройство обладает высоким уровнем надежности, позволяет обеспечить соблюдение условий эксплуатации и сохранить

ресурс аккумуляторной батареи, повысить надежность и срок службы всего космического аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. BU-204: How do Lithium Batteries Work? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>, свободный (дата обращения: 11.02.2024).
2. Safety Concerns with Li-ion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://batteryuniversity.com/article/bu-304a-safety-concerns-with-li-ion>, свободный (дата обращения: 12.02.2024).
3. Кузьмина Н.А. Система энергоснабжения космического аппарата // Решетневские чтения. – 2017. – № 21 (1). – С. 274–276.
4. Сравнение вариантов реализации модуля контроля и управления литий-ионных аккумуляторных батарей / Н.Н. Цебенко, А.В. Иванов, В.А. Пчельников, А.А. Правикова, В.М. Рулевский, А.В. Фёдоров // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 2 (21). – С. 103–106.

УДК 621.311.69

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.В. Цвинтарный, Н.И. Чумаков, А.В. Чирков, В.С. Халук
Научный руководитель Н.А. Савочкин, ассистент каф. ПрЭ
Проект ГПО ПрЭ-2308. Система электропитания малого космического аппарата с улучшенными массогабаритными показателями
г. Томск, ТУСУР, i.cvintarnyi@yandex.ru

Определены магнитные параметры дросселя, расчет габаритов сердечника, выбор материала магнитопровода, число витков обмотки дросселя.

Ключевые слова: зарядное устройство, кольцевой сердечник, дроссель, магнитопровод, пермаллой, ферриты, электротехническая сталь, площадь окна сердечника, площадь поперечного сечения сердечника.

В рамках проекта ГПО рассматривается проблема снижения массогабаритных показателей устройств электропитания. Около 30% массы космического аппарата занимают системы электропитания. Система питания состоит из преобразователей, солнечной и аккумуляторной батареи. Ниже рассмотрено зарядное устройство аккумуляторной батареи, в основе которой лежит, непосредственный понижающий преобразователь (рис. 1). Одним из самых объемных и тяжелых

элементов понижающего преобразователя является дроссель. Его составные компоненты – сердечник (магнитопровод) и провод обмотки. Оптимальным способом уменьшения массогабаритных показателей дросселя является выбор наиболее подходящего материала магнитопровода. Материалы выбираются из реально применяемой отечественной электронно-компонентной базы.

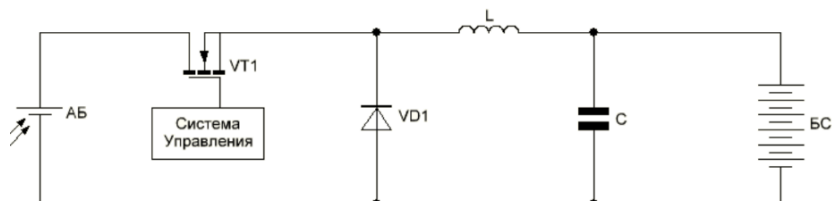


Рис. 1. Схема понижающего преобразователя

Конфигурация сердечника может иметь разную форму (рис. 2). Наиболее часто применяют кольцевой тип предпочтительно для устройств низкой и средней мощности [1].



Рис. 2. Типы сердечников: кольцевые (а), продольные (б), разборные (в)

При выборе обмотки сердечника необходимо учитывать параметры материала: магнитную проницаемость, коэрцитивную силу, индуктивность насыщения, удельное сопротивление. Распространённые отечественные марки магнитопровода: ферриты, пермаллой, электротехническая сталь [2]. Приведем сравнительную характеристику параметров материалов (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные характеристики магнитопровода

Тип магнитопровода	Марка	Магнитная проницаемость		H_c , А/м	B_s , Тл	ρ , мкОм	p , Вт/кг
		μ_{min} , МГн/М	μ_{max} , МГн/М				
Пермаллой	79НМ	25	150	2,4	0,75	0,55	1,28
Ферриты	50ВЧ2	45	170	360	0,3	100	-
Электротехническая сталь	3 421	600	16 000	44	1,52	0,52	0,5

Сталь электротехническая сернистая марки 3411 – холоднокатаная анизотропная лента. Химический состав: железо Fe 97,2%; кремний 2,8%. Толщина ленты магнитопровода 0,2 мм.

Важнейшим показателем дросселя является $(S_M \times S_{OK})_{\text{расчетное}}$. Рассчитывается по формуле [2. С. 79]:

$$(S_M \times S_{OK})_{\text{расчетное}} = \left(\frac{2W_{\text{макс}}}{k_{\phi} k_{OK} k_j B_s} \right)^{\frac{1}{1+y}},$$

где $W_{\text{макс}}$ – максимальная энергия накопления дросселя:

$$W = LI_m^2/2,$$

L – индуктивность, $L = 28 \cdot 10^{-6}$ Гн; I_m – максимальный ток дросселя, равный

$$I_m = I_H + \Delta I/2,$$

I_H – действующее значение тока, $I_H = 5$ А; ΔI – размах тока дросселя, А; B_s – рабочая индукция материала, Тл; k_{ϕ} – показатель формы, $k_{\phi} = 1$; k_{OK} – коэффициент заполнения окна проводом первичной обмотки, $k_{OK} = 0,26$; j – коэффициент перегрева при $\Delta T = 50$ °С, $k_j = 590$ А/см²; y – коэффициент конфигурации сердечника, $y = 0,12$.

Из формулы видно, что параметр $S_M \times S_{OK}$ обратно зависит от индукции насыщения B_s . Чем выше индукция насыщения, тем ниже показатель. Полученные значения представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Рассчитанные параметры относительно типа магнитопровода

Тип магнитопровода	$(S_M \times S_{OK})_{\text{расчетное}}, \text{ см}^4$
Пермаллой	0,259
Ферриты	0,091
Электротехническая сталь	0,041

Подберем сердечник, соответствующий параметру $S_M \times S_{OK}$ для электротехнической стали марки 3421. При определении типоразмера сердечника должно выполняться условие

$$(S_M \times S_{OK})_{\text{выбранный}} \geq (S_M \times S_{OK})_{\text{расчетное}}.$$

Из ряда отечественных сердечников [3] выбираем ОЛ 8/12-6.5, габариты приведены в табл. 3.

Габаритные показатели выбранного сердечника

Геометрические размеры сердечника ОЛ 8/12-6.5			$S_{ок}, \text{см}^2$	$S_M, \text{см}^2$	$(S_M \times S_{ок})_{\text{выбранный}}, \text{см}^4$
$D_{\text{внеш.}} \text{ мм}$	$d_{\text{внут.}} \text{ мм}$	$h, \text{мм}$	0,503	0,091	0,046
12	8	6,5			

Типоразмер магнитопровода $(S_M \times S_{ок})_{\text{выбранный}}$ определяется по формуле

$$(S_M \times S_{ок})_{\text{выбранный}} = S_M \times S_{ок},$$

где $S_{ок}$ – площадь окна сердечника, равная

$$S_{ок} = \frac{\pi \cdot d_{\text{внут}}^2}{4};$$

S_M – площадь поперечного сечения сердечника, равная

$$S_M = \frac{(D_{\text{внеш}} - d_{\text{внут}})}{2} \cdot h \cdot k_3.$$

Сердечник отечественного производства – ОЛ16/25-6,5 – соответствует $(S_M \times S_{ок})_{\text{выбранный}} \geq (S_M \times S_{ок})_{\text{расчетное}}$ условию: $0,046 > 0,041$ (значения в табл. 2, 3). Сердечник будет обладать зазором длиной 1 мм. Зазор позволит увеличить протекающий ток в сердечнике, при этом магнитная проницаемость уменьшается без изменения напряжения.

Определим значение магнитной проницаемости, которым должен обладать дроссель. Рассчитывается по формуле [2. С. 76]

$$\mu = \frac{B_s \cdot l_{\text{ср}}}{\mu_0 \cdot k_{\text{ф}} \cdot k_{\text{ок}} \cdot k_j \cdot S_{ок} \cdot j},$$

μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; где j – плотность тока в обмотках дросселя при постоянном перегреве, равная

$$j = k_j \cdot (S_M S_{ок})^{\gamma};$$

$l_{\text{ср}}$ – средняя длина магнитной силовой линии, равная [2. С. 69]

$$l_{\text{ср}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{внеш}} + d_{\text{внут}}}{2} \right) - \delta,$$

δ – длина зазора кольцевого сердечника, $\delta = 0,01$ мм.

Расчетная магнитная проницаемость $\mu = 51$ Гн/м.

Определившись с формой и материалом сердечника, необходимо вычислить число витков дросселя. Рассчитывается по формуле [2. С. 82]

$$w = \sqrt{(L \cdot I_{\text{ср}} \cdot 10^2) / (\mu_0 \mu \cdot S_M)} .$$

Расчетное число витков обмотки $w = 40$.

Наименьшим показателем типоразмера $S_M \times S_{\text{ок}}$ обладает электротехническая сталь, параметры материала превосходят пермаллой и ферриты в 2 и в 6 раз соответственно. При этом дроссель способен накапливать необходимое количество энергии.

Конфигурация: кольцевой сердечник из электротехнической стали марки 3411, и количеством витков обмотки, равным 40, позволит снизить массогабаритные показатели зарядного устройства в сравнении с другими материалами магнитопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легостаев Н.С. Магнитные элементы электронных устройств: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Томск: ТУСУР, 2014. – 186 с.
2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учеб. пособие: [Электронный ресурс]. – Томск: ТУСУР, 2014. – 239 с.
3. Искандрян М.Е. ГОСТ 24011-80. Магнитопроводы ленточные кольцевые. Конструкции и размеры / М.Е. Искандрян, Н.В. Прусаков, В.В. Варенцова. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.

УДК 621.314

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ *А.А. Устюгов, студент*

*Научный руководитель Н.А. Воронина, доцент ОЭЭ ИШЭ, к.т.н.
г. Томск, ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ, aau41@tpu.ru*

Приведены расчет и моделирование преобразователя электрической энергии – зарядного устройства для АКБ 6СТ-55А асимметричным током.

Ключевые слова: преобразователь топологии SEPIC, зарядное устройство, моделирование в Matlab Simulink.

Проектируется преобразователь электрической энергии – зарядное устройство для АКБ 6СТ-55А асимметричным током. Один из подходов к созданию такого устройства – использование преобразователя с разделительным конденсатором и непрерывным входным током топологии SEPIC [1]. Обоснованием выбора такого преобразова-

теля может служить необходимость устранения негативного фактора сульфатации рабочих пластин. Это делается при помощи многократного заряда, при котором время разряда короче [2]. Схема SEPIC не является единственным возможным решением, и реализацией зарядного устройства для данной АКБ мог бы послужить обратногоходовой или повышающий преобразователь [3]. Прежде всего, топология SEPIC имеет ряд преимуществ перед обратногоходовыми преобразователями: низкий уровень импульсных помех благодаря меньшему размаху и длительности переходных процессов; отсутствует необходимость в расчете и изготовлении трансформатора. Бестрансформаторная схема легче, меньше и дешевле. Также, когда мы используем топологию SEPIC, это устраняет необходимость аккумулирования постоянной составляющей при отключении нагрузки. Таким образом, было решено использовать преобразователь топологии SEPIC в связи его очевидными преимуществами.

На схеме зарядного устройства, изображенной на рис. 1, показан датчик тока, который используется для защиты от перегрузок. Преобразователь SEPIC питается от входного мостового выпрямителя, а на выходе подключается нагрузка – аккумуляторная батарея. Для регулирования выходного напряжения используется непосредственный преобразователь постоянного напряжения (НПН), включающий в себя транзистор, работающий в ключевом режиме. Дроссели $L1$, $L2$ и конденсаторы $C2$, $C3$ являются промежуточными накопителями энергии, позволяющими получать выходное напряжение как ниже, так и выше входного. Индуктивность дросселя $L1$ обеспечивает непрерывность потребляемого тока. Для разряда аккумулятора используется нагрузочный резистор $R2$, который по необходимости подключается открытием транзистора $VT2$. Управляющие импульсы формируются системой управления.

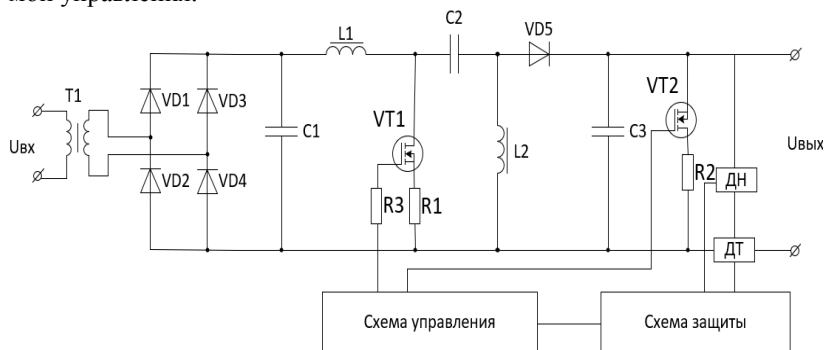


Рис. 1. Схема структурная зарядного устройства

Для данной схемы (рис. 2) были рассчитаны следующие параметры [4]: частота ШИМ 100 кГц, длительность импульсов управления силовым транзистором $\gamma = 0,5$ (при неизменном входном напряжении сети). Индуктивности (обеспечивающие коэффициент пульсаций тока $k_n = 2\%$) $L1$ и $L2$, равные по 50 мкГн; сопротивление резистора в цепи затвора и токоограничивающих резисторов $R1 = 17$ Ом и $R3$, сопротивление нагрузочного резистора $R2 = 25$ Ом. Емкости входного, выходного и разделительного конденсаторов $C1 = 248$ мкФ, $C2 = 990$ мкФ, $C3 = 1170$ мкФ.

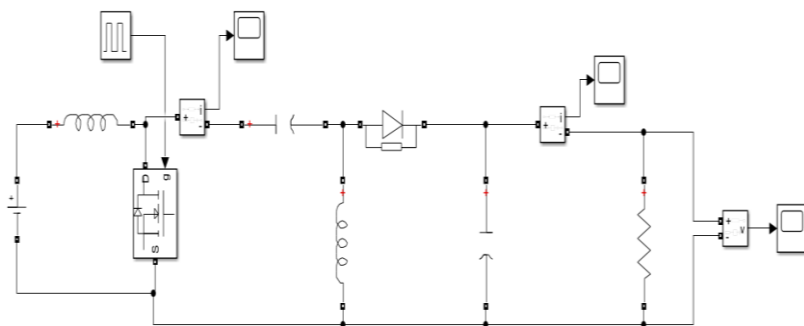


Рис. 2. Модель в среде MATLAB силовой цепи зарядного устройства на базе преобразователя SEPIC

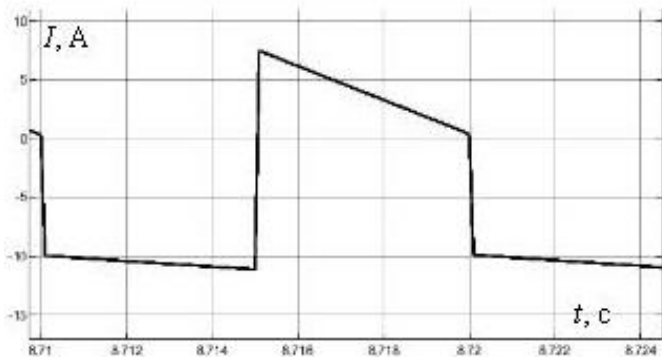
В режиме заряда аккумуляторной батареи она выступает в виде нагрузки для преобразователя SEPIC, поэтому на рис. 2 аккумуляторная батарея заменена резистором. Транзистор VT2 включается однократно для разряда аккумулятора на резисторе $R2$ по команде системы управления для выравнивания напряжения АКБ.

Асимметричный заряд реализуется посредством изменения длительности открытого состояния транзистора VT1 при переменной длительности импульсов γ , при этом ток заряда имеет вид, представленный на рис. 3, а.

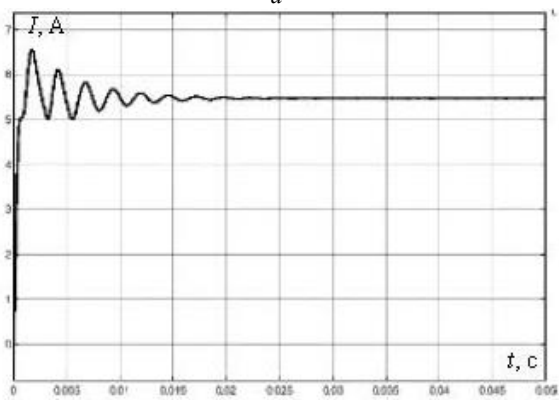
Алгоритм управления, реализующий эту технологию, закладывается в микроконтроллер системы управления.

На рис. 3, б, в представлены диаграммы тока дросселя $L2$ и напряжения на АКБ в переходном и установившемся режимах.

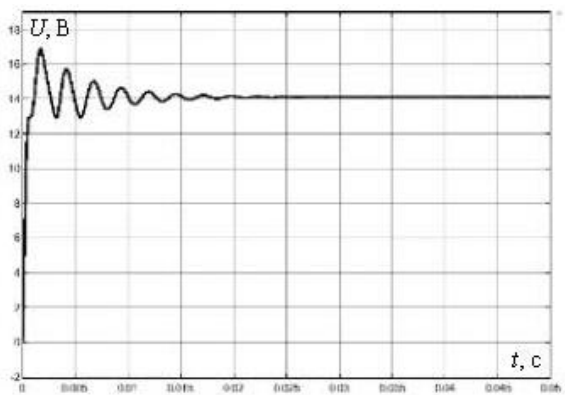
Для аккумулятора АКБ 6СТ-55А номинальный ток заряда по технической документации из расчета времени работы 10 ч составляет 5,5 А. Тогда ток дросселя в асимметричной форме имеет вид, приведенный на рис. 3, а. Полученный результат моделирования 5,51 А соответствует расчетным значениям установившегося режима работы.



a



б



в

Рис. 3. Ток заряда (*a*), ток дросселя $L2$ (*б*) и напряжение на нагрузке (*в*)

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристов А.В. Преобразователи электрической энергии силовой электроники: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 2 / А.В. Аристов, С.К. Земан, Д.Ю. Ляпунов, А.Г. Юдинцев; под ред. В.П. Петровича. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2021. – 200 с.
2. Сметанкин Г.П. Исследование эффективности заряда никель-кадмиевых аккумуляторных батарей асимметричным и постоянным током / Г.П. Сметанкин, А.С. Бурдюгов, С.С. Матекин // Электрохимическая энергетика. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 164–167.
3. Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: учеб. пособие / В.П. Петрович, Н.А. Воронина, А.В. Глазачев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 240 с.
4. Брянцев А.А. Методика определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора / А.А. Брянцев, В.Г. Букреев, А.А. Шилин // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 96–101.

УДК 62-573.2

СХЕМА ЗАПУСКА ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ОТ РЕЗЕРВНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

А.Ю. Вильгельм, студент; Н.А. Савочкин, ассистент
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, wilhelm1901@mail.ru

Представлено устройство, которое будет запускать по команде основное питание энергопреобразующей аппаратуры, либо переключать ее на резервное питание в случае, когда заряд аккумулятора основного источника опускается до критически низкого безопасного уровня.

Ключевые слова: схема запуска, резервное питание, стабилизатор напряжения.

Устройство запуска предназначено для систем электропитания, которые в своем составе имеют два источника питания: генератор (первичный источник в виде гидро-, тепло-, ветрогенератора, солнечной панели) и накопитель (аккумулятор), вторичный источник питания – ВИП, а также энергопреобразующую аппаратуру, обеспечивающую согласованную работу перечисленных элементов. Для того чтобы не допускать глубокого разряда аккумулятора (ниже безопасного уровня), энергопреобразующая аппаратура отключается, когда на первичном источнике отсутствует энергия. Устройство запуска позволяет осуществить повторный запуск системы электропитания от первичного источника в случае появления на нем энергии. Аппаратура также защищает систему от подачи питания на выход до поступления разрешающей работы команды, например при транспортировке

устройства. На рис. 1 представлена схема устройства запуска резервного питания.

Устройство запуска состоит из трех частей: компенсационного стабилизатора на MOSFET-транзисторе VT1; линейного стабилизатора на микросхеме DA1; а также переключающего элемента, собранного на реле KV1 и ключе SA1, который до прихода разрешающей команды находится в разомкнутом (правом по рисунку) положении.

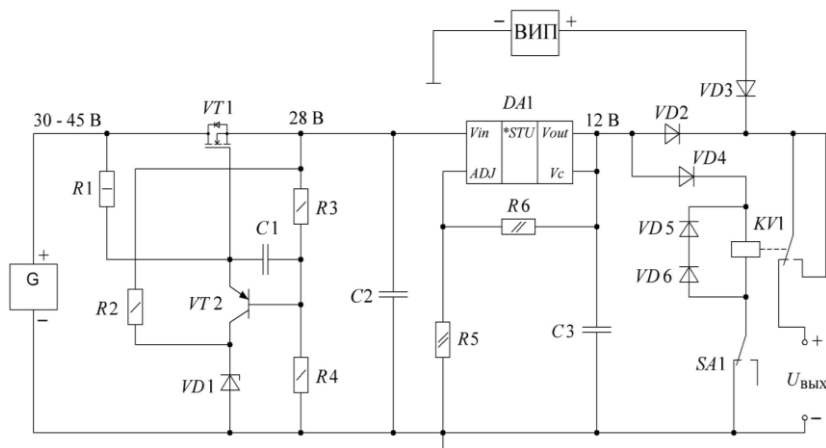


Рис. 1. Схема устройства запуска резервного питания

При штатном режиме работы ключ SA1 находится в положении, как показано на рис. 1. Питание нагрузки осуществляется от вторичного источника ВИП через диод VD3. В случае если напряжение вторичного источника опустится до критического уровня, питание нагрузки перейдет на резервную линию от первичного источника (генератора G) [1] через диод VD2. Как только напряжение ВИП восстановится до максимального значения, система автоматически перейдет на основную линию питания. Ключ SA1 имитирует радиокomанду «включение устройства».

На вход компенсационного стабилизатора [2] подается входное напряжение в диапазоне 30–45 В, а на выходе стабилизируется 28 В. В качестве опорного напряжения используется стабилитрон VD1. Выходное напряжение стабилизации зависит от транзистора VT1. Степень открытия транзистора VT1 задается сопротивлением R1.

На вход линейного стабилизатора [3] подается 28 В, а на выходе стабилизируется 12 В. Выходное напряжение задается резистивным делителем на сопротивлениях R5 и R6. Конденсаторы C2 и C3 служат

для сглаживания пульсаций, которые могут образоваться на входе схемы.

В среде LTSpice проведено моделирование работоспособности схемы, а именно исследована зависимость выходного напряжения схемы от величины сопротивления $R1$. Имитационная модель устройства представлена на рис. 2, зависимость – на рис. 3.

Из результатов моделирования установлено, что схема выдает требуемое выходное напряжение при сопротивлении резистора $R1$ не более 20 кОм.

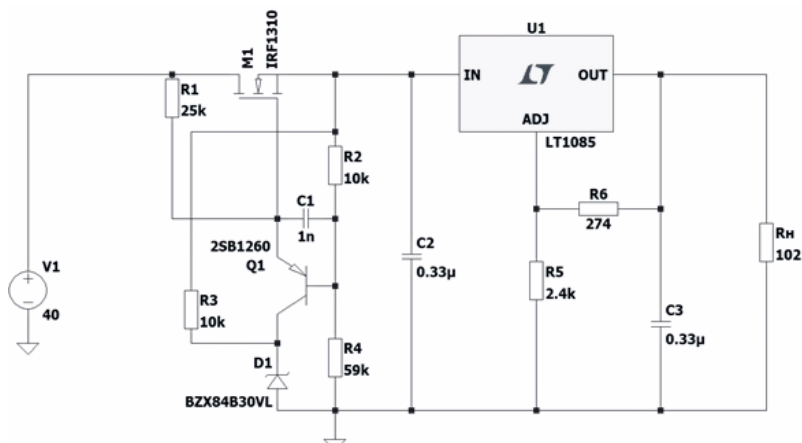


Рис. 2. Имитационная модель устройства запуска

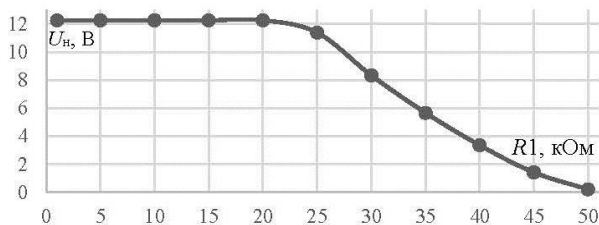


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от сопротивления $R1$

Для проверки работоспособности схемы проведено экспериментальное исследование влияния сопротивления $R1$ на выходное напряжение компенсационного стабилизатора. Также рассчитан КПД схемы для каждого сопротивления $R1$. Данные зависимости представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

По результатам эксперимента установлено, что наиболее подходящее сопротивление $R1$ составляет 560 Ом. На таком сопротивлении

выделяется значительное количество тепла, для этого необходимо использовать резистор с рассеиваемой мощностью не менее 1 Вт.

Таким образом, результаты эксперимента подтвердили работоспособность устройства запуска в заданном диапазоне входного напряжения. В случае отсутствия энергии на первичном источнике энергопреобразующая аппаратура отключается. Из-за наличия линейного стабилизатора схема имеет относительно невысокий КПД, но так как устройство работает кратковременно, потери энергии можно считать несущественными. С учетом тепловыделения схемы все элементы выбраны с запасом, чтобы избежать перегрева.

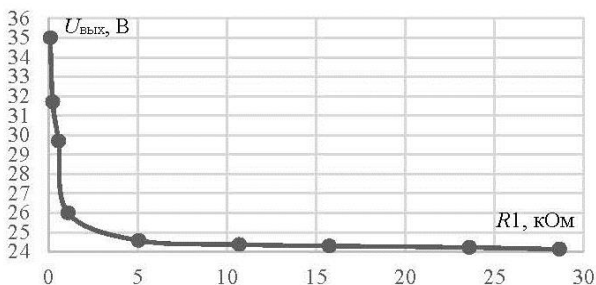


Рис. 4. Зависимость напряжения компенсационного стабилизатора от сопротивления $R1$

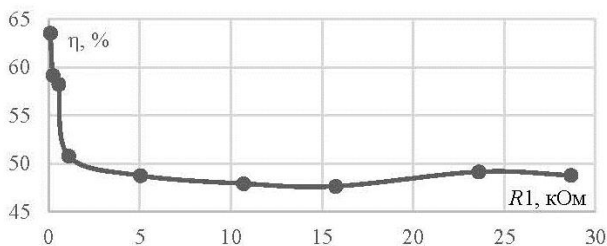


Рис. 5. Зависимость КПД схемы от сопротивления $R1$

ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы резервирования источников питания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lib.qrz.ru/node/9770?ysclid=lszka7b23249219990>, свободный (дата обращения: 24.02.2024).

2. Компенсационные стабилизаторы напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronicblog.ru/silovaya-elektronika/kompensacionnye-stabilizatory-napryazheniya.html>, свободный (дата обращения: 24.02.2024).

3. Параметрические стабилизаторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digteh.ru/BP/Stabilizat/Param>, свободный (дата обращения: 24.02.2024).

ФАЗОВАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ДЛЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

И.В. Зелинский, студент ПИШ;

Н.С. Легостаев, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, igor.zelinskii@tusur.ru

Рассматривается принцип работы системы автоматической подстройки частоты путем регулирования фазы напряжения управляющего генератора так, что она становится равной частоте задающего генератора.

Ключевые слова: индукционный ток, резонансный контур, индуктор, фазовая автоподстройка частоты.

Индукционный нагрев – способ нагрева материалов бесконтактным методом при помощи токов высокой частоты, индуцируемых изменяющимся по гармоническому закону магнитным полем.

Развитие установок индукционного нагрева на современном этапе связано с активным созданием новых схем управления и деталей оборудования, способных повысить эффективность процесса нагрева и улучшить эксплуатационные характеристики установок. Основным функциональным узлом установок индукционного нагрева (УИН) являются резонансный инвертор тока или напряжения, а также система управления. Применение резонансных инверторов повышает эффективность воздействия на материал токов высокой частоты. Для обеспечения автоматической подстройки частоты (АПЧ) необходимо согласовать частоту переключения транзисторов инвертора с частотой колебательного контура нагрузки. Этого можно добиться благодаря реализации нулевого фазового сдвига между током и напряжением.

Повышение скорости и качества нагрева достигается при использовании индукционного нагрева на резонансе. Ввиду изменяющихся параметров LC-контура рабочая частота инвертора должна быть больше резонансной частоты (рис. 1).

Функциональная схема ФАПЧ приведена на рис. 2.

Система управления использует информацию о фазе и частоте колебаний в LC-контуре для генерации управляющих импульсов транзисторов инвертора, который в установленном режиме обеспечивает возбуждение колебаний в такт собственной частоты LC-контура. При пуске частота управляющих импульсов инвертора задается выше резонансной частоты, например, в два раза, а затем снижается и уже при достижении тока в колебательном контуре (0,1–0,15) от максимального тока колебательного контура система управления

переходит в режим обеспечения работы инвертора в резонансном режиме.

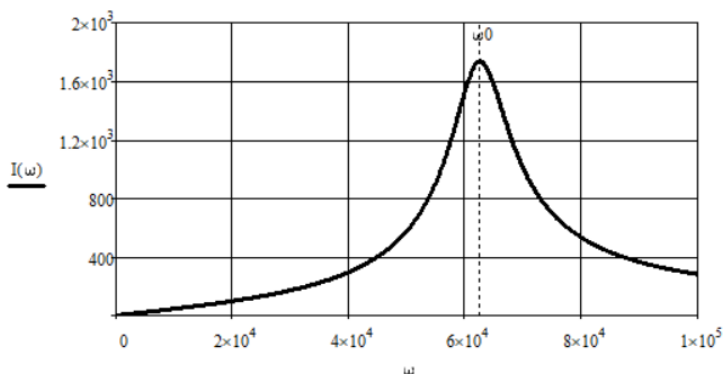


Рис. 1. АЧХ последовательного резонансного контура

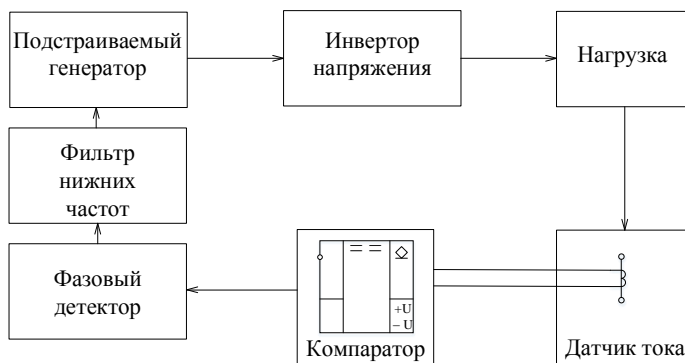


Рис. 2. Функциональная схема ФАПЧ

Система ФАПЧ постоянно согласовывает частоту работы силовых транзисторов инвертора с частотой нагрузочного контура. Микросхема К564ГГ1 используется для реализации ФАПЧ. В состав микросхемы фазовой автоподстройки частоты входят: генератор, управляемый напряжением (ГУН), фазовый компаратор, фильтр низкой частоты, представляющий собой интегрирующую цепь (рис. 2). Главный узел – ГУН, который вырабатывает однополярные импульсы амплитудой, близкой к напряжению питания. Выходное напряжение ГУН подается на один вход фазового компаратора ФК, а на второй его вход поступают внешние сигналы.

Импульсы с выхода ГУН и сигналы сравниваются фазовым компаратором, который преобразует разницу в импульсы, используя ло-

гический элемент «исключающее ИЛИ». Входные импульсы сглаживаются интегрирующей цепью, чтобы сформировать напряжение расогласования. Это напряжение управляет частотой генератора, пока частоты входного сигнала и генератора не сравняются.

На рис. 3 представлена схема подключения микросхемы К564ГГ1.

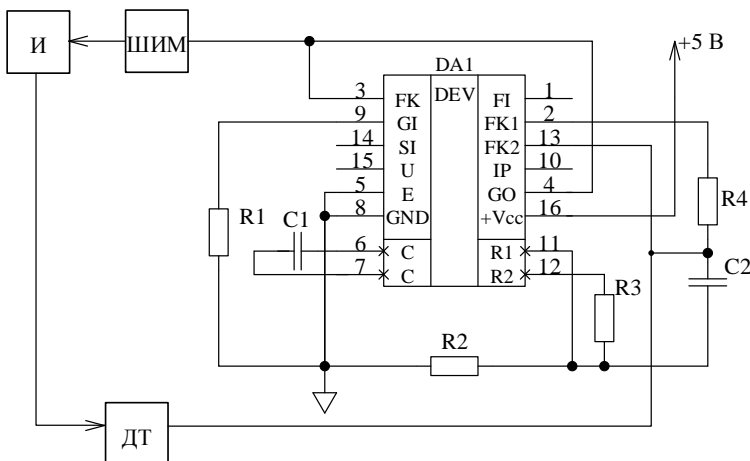


Рис. 3. Схема подключения микросхемы К564ГГ1

Практическое применение фазовой автоподстройки частоты в установках индукционного нагрева позволяет регулировать частоту генератора в широком диапазоне значений. Это особенно важно при нагреве объектов разных размеров и материалов, так как оптимальная частота может значительно различаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осадченко В.Х. Резонансные свойства RLC-цепей: учеб.-метод. пособие / В.Х. Осадченко, Я.Ю. Волкова, Ю.А. Кандрин. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2013. – 64 с.
2. К564ГГ1. Справочный материал фирмы «ЭКСИТОН». – URL: <https://eandc.ru/upload/iblock/98d/98d9c3f3ddb43f85ba0383e1ecd5508e.pdf> (дата обращения: 07.03.2024).
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Технофера, 2005. – 632 с.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ MOSFET-ТРАНЗИСТОРАМИ В СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

В.И. Карягин, аспирант каф. ПрЭ

Научный руководитель А.Г. Юдинцев, директор НИИ АЭМ ТУСУРа,

к.т.н, доцент

Проект НИИ АЭМ ТУСУРа. ИБП-10

г. Томск, ТУСУР

Приводятся результаты исследования разработанного драйвера с функцией защиты силовых транзисторов, что позволяет значительно сократить время разработки преобразователей и повысить надежность изделия.

Ключевые слова: драйвер, управление MOSFET-транзисторами, супервизор.

В мире электроники важную роль выполняют устройства преобразования энергии переменного и постоянного тока. В большинстве случаев энергию передают от источника к потребителю с помощью переменного тока. Потребитель после получения энергии преобразовывает ее для питания различного оборудования. Для преобразования энергии используют DC/DC-, AC/DC-, DC/AC- или AC/AC-преобразователи. DC расшифровывается как постоянный ток (англ. direct current), а AC – как переменный ток (англ.: alternating current).

Для согласования уровня сигналов управления с необходимым уровнем напряжения управления MOSFET-транзисторами во всех этих устройствах используется драйвер [1].

При разработке конкретного преобразователя, помимо установки микросхемы драйвера, необходимо разработать устройства, выполняющие функции драйвера и защиты транзистора. Это позволяет значительно сократить время разработки преобразователей и повысить надежность изделия.

Драйверы представляют собой интегральные или гибридные микросхемы. Кроме того, при необходимости драйвер обеспечивает гальваническую развязку цепи управления от затвора транзистора.

Для передачи управляющих импульсов от контроллера к драйверам требуется усилить сигналы и обеспечивать помехоустойчивость цепей управления, что осуществляется с помощью усилителя мощности. При этом драйвер должен обеспечивать ряд функций:

- гальванически развязать вход и выход;
- использовать инвертированный входной сигнал с высоким пороговым напряжением;

• обеспечить защиту от отключения питания логических элементов.

Функциональная схема разработанного драйвера приведена на рис. 1.

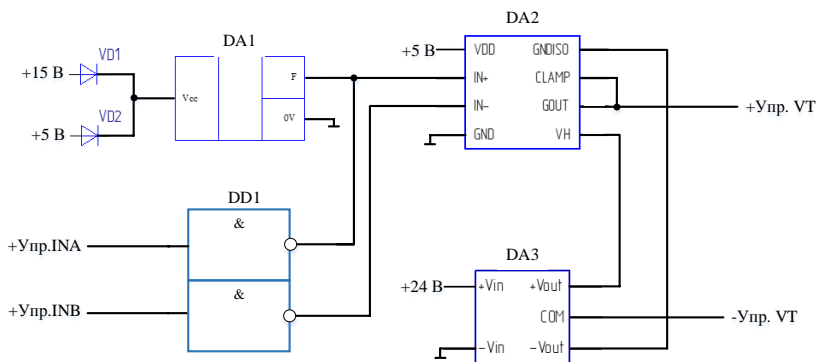


Рис. 1. Схема драйвера

Обозначения: VD1, VD2 – диоды; DD1 – преобразователь уровня; DA1 – супервизор; DA2 – драйвер; DA3 – DC/DC-преобразователь.

Схема работает следующим образом. На вход элемента DD1 поступают логические сигналы +Упр. INA и +Упр. INB, которые соответствуют таблице управления УМ (таблица). Данные логические сигналы меняют свой уровень, например, из логической «1» на логический «0» и наоборот. Описанная процедура реализована для помехоустойчивости устройства. С выхода DD1 логические сигналы поступают на входы драйвера DA2 (IN+, IN-), осуществляющего управление силовым транзистором [2].

Логические сигналы управления драйвера

Упр. INA	Упр. INB	INA	INB	OUT
1	0	0	1	0
0	0	1	1	0
1	1	0	0	0
0	1	1	0	1

Питание вторичных цепей DA2 осуществляет двуполярный гальванически развязанный преобразователь DA3 с малой проходной паразитной емкостью (+20/-5 В). Первичные цепи драйвера DA2 запитаны от постоянного источника питания напряжением +5 В.

Силовой транзистор открыт при подаче на вход +Упр.INA инвертора DD1 сигнала низкого уровня, в это же время на входе +Упр.INB должен быть сигнал высокого уровня.

Входы Упр.INB предусмотрены для внешней блокировки ключей. Это позволяет предотвратить открытие транзисторов в стойке.

Для предотвращения ложного открытия MOSFET из-за снижения или пропадания питания собственных нужд был добавлен супервизор DA1. Диоды VD1 и VD2 позволяют обеспечить питание DA1 в начальный момент времени.

При снижении уровня питания собственных нужд +15 В ниже +7 В, когда выходные ключи инвертора DD1 заперты, поданные одновременно логические 1 или 0 на входы INA и INB драйвера в соответствии с таблицей, сигналы управления приводят к запирающему силовому транзистору. Это важно для режима нештатного выключения импульсного преобразователя.

На рис. 2 показано выходное напряжение драйвера при частоте 50 кГц. Из рисунка следует, что время спада и нарастания фронта для драйвера 1 составляет менее 500 нс, а для драйвера 2 – более 500 нс. Это иллюстрирует достаточное быстродействие разрабатываемого драйвера. Таким образом, использование драйвера обеспечивает повышение КПД преобразователя за счет быстродействия при переключении транзисторного ключа.



Рис. 2. Оциллограмма напряжения на выходе драйверов:
1 – разрабатываемый драйвер, 2 – драйвер на микросхеме Si8261BCC-C-IP

Дополнительное преимущество обеспечивается уровнем напряжения выхода, которое составляет -5 В. Это позволяет быстрее разрядить затворный конденсатор, тем самым быстрее перевести MOSFET в закрытое состояние.

Таким образом, в ходе разработки расширены функциональные способности устройства управления, в частности:

1) в разработанном драйвере предусмотрена защита от просадки напряжения питания;

2) уровни входных сигналов управления обеспечиваются высоким порогом напряжения, что улучшает помехозащищенность устройства;

3) время нарастания и спада импульсов уменьшается примерно на 20% за счет выбранного уровня напряжения элемента DA3 –5 В и тем самым обеспечивается лучшее быстродействие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интегральные драйверы MOSFET и IGBT транзисторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://engineeringssystem.ru/istoriya-elektrotehniki-i-elektroenergetiki/>, свободный (дата обращения: 01.03.2024).

2. Datasheet STGAP2HS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stgap2hs.pdf>, свободный (дата обращения: 05.03.2024).

УДК 621.314.572

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОГО LCL-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА

А.Д. Гончаров, магистрант каф. ПрЭ

*Научный руководитель А.В. Осипов, д.т.н., доцент каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, 2alexey900@gmail.com*

Проведен анализ резонансного LCL-преобразователя в среде имитационного моделирования MATLAB Simulink, в режиме стабилизации тока индуктора при изменении его сопротивления.

Ключевые слова: LCL-преобразователь, индуктор, частотное регулирование, MatLab Simulink.

В индукционном нагреве необходимо формирование некоторого коэффициента передачи тока K_I , который позволит увеличить ток индуктора. Для этой цели часто применяется Т-образный резонансный LCL-преобразователь [1–5]. Целью работы является анализ характеристик такого преобразователя в режиме стабилизации тока индуктора в процессе нагрева при изменении активной составляющей импеданса. Необходимый коэффициент передачи тока достигается путем параллельной компенсации, т.е. параллельным соединением конденсатора. Использование инвертора напряжения требует включения входного дросселя и приводит к формированию Т-образного резонансного

LCL-преобразователя. Для проведения анализа построена имитационная модель LCL-преобразователя в среде MatLab Simulink и представлена на рис. 1.

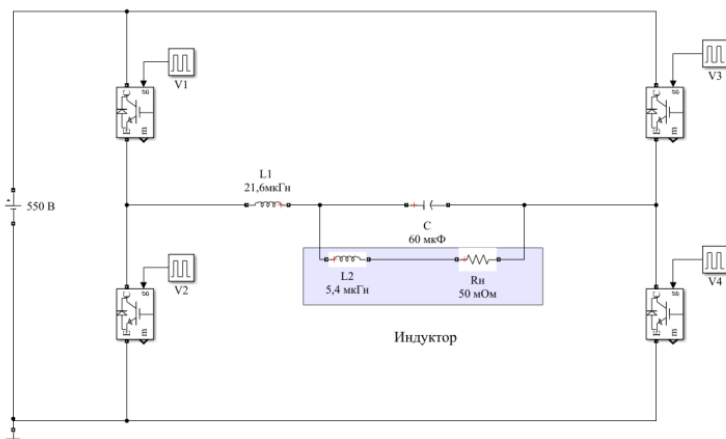
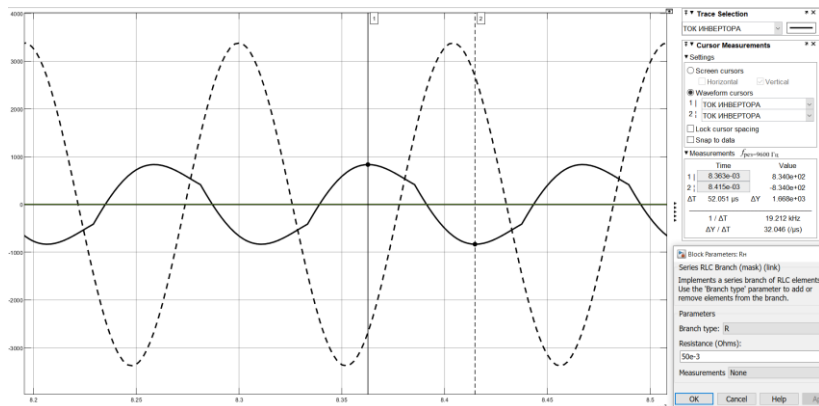


Рис. 1. Схема LCL-преобразователя в среде MatLab Simulink

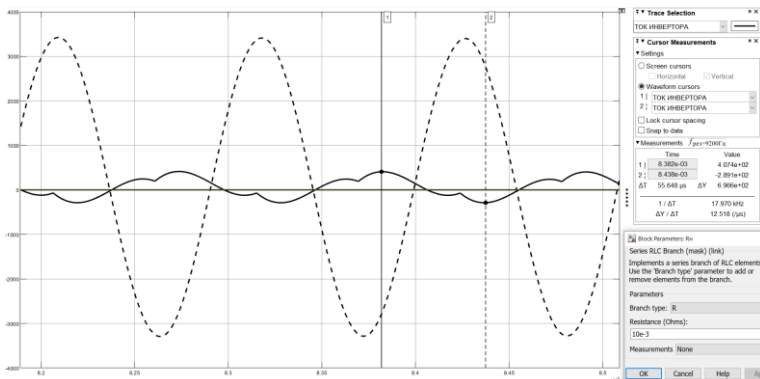
Ток инвертора при разном сопротивлении индуктора R_n (от 10 до 90 мОм) в режиме стабилизации тока индуктора 3,3 кА частотным регулированием показан на ри. 2.

В резонансном LCL-преобразователе частотное регулирование позволяет стабилизировать ток индуктора, однако при низких добротностях контура изменение частоты приводит к значительному увеличению тока инвертора, что завышает его габаритную мощность.



а) $R_n = 50 \text{ мОм}$, $f_{рез} = 9,6 \text{ кГц}$

Рис. 2 (начало)



б) $R_n = 10 \text{ мОм}$, $f_{рез} = 9,2 \text{ кГц}$

Рис. 2 (окончание). Токи $I_{инв}$ и I_n (пунктирная линия) с частотным регулированием

Полученные данные представлены в таблице.

Характеристики при изменении сопротивления индуктора R_n с частотным регулированием

	Сопротивление индуктора R_n , мОм		
	90	50	10
Сдвиг фаз между током индуктора I_n и инвертора $I_{инв}$ φ , °	60	29	23
Амплитуда тока инвертора $I_{инв}$, кА	1,5	0,834	0,348
Добротность контура Q	3,3	6	30

ЛИТЕРАТУРА

1. Improving the efficiency of IGBT series resonant inverters using pulse density modulation / V. Esteve, E. Sanchis-Kilders, J. Jordan, E.J. Dede, C. Cases, E. Maset, J.B. Ejea, A. Ferreres // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, No. 3. – P. 979–987.
2. Zgraja J. The influence of high harmonic on calculation accuracy of induction heating system supplied by series inverter // Przegląd Elektrotechniczny. – 2008. – Vol. 84, No. 7. – P. 83–85.
3. Fischer G.L. An Inverter System for Inductive Tube Welding utilizing Resonance Transformation / G.L. Fischer, H. Dort // IEEE IAS. – 1994. – P. 833–840.
4. Mauch K. Transistor Inverters for Medium Power Induction Heating Applications // IEEE IAS. – 1986. – P. 555–562.
5. Resonance Transformation for Induction Heating / G.L. Fischer, H. Dort, H. Knaak, G. Amler, B. Hemmer // PCIM Europe. – March/April 1994. – P. 76–79.
6. Баёк М.М. Резонансный LCL-преобразователь в режиме согласования с индуктором / М.М. Баёк, А.Д. Гончаров, А.В. Осипов // Матер. XV Междунар. науч.-практ. конф. – 2023. – Т. 1. – 192 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОМОНИТОРИНГА МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.С. Меркушев, студент;

Д.Ф. Габбасов, доцент каф. ТММ УГНТУ

г. Уфа, УГНТУ, masters777@mail.ru

Описаны работы по созданию инновационной системы стационарного мониторинга. Ее отличает: простота во внедрении и эксплуатации, надежность, возможность интеграции с уже имеющимся программным обеспечением, построение на компонентной базе отечественных предприятий и дружественных стран.

Ключевые слова: вибродиагностика, датчик, машинное оборудование, стационарный мониторинг, передача данных.

Предприятия, эксплуатирующие большой парк машинного оборудования, заинтересованы в сокращении ремонтного фонда путем прогнозирования и планомерного вывода в ремонт отдельных единиц оборудования. Для решения этого вопроса целесообразно интегрировать имеющиеся на предприятиях системы технического обслуживания с системами стационарного вибромониторинга для учета фактического состояния оборудования. Чтобы построить такую систему мониторинга, необходимо установить датчики вибрации на каждую единицу оборудования. Имеющиеся сегодня системы уже предоставляют такую возможность, однако все они имеют ряд существенных недостатков. К ним можно отнести сложность в проектировании, настройке и установке, большую материалоемкость исполнения, значительные эксплуатационные затраты, а самое главное – высокую стоимость самих этих систем.

Исходя из проведенных исследований, именно ввиду высокой стоимости такие системы пока ещё не получили широкого распространения. Понимая, какими затратами предприятию обернется установка стационарной системы вибромониторинга на все оборудование, персонал, принимающий решение в вопросах ремонта и обслуживания, предпочитает просто заменить на эти деньги часть эксплуатируемого оборудования на новое. Следовательно, массовость и доступная цена – основные требования, предъявляемые сегодня к таким системам. Также не менее важным является удобство пользования и совместимость с уже имеющимися средствами контроля и учета, такими как расход, давление, температура продукта. Рассуждая на перспективу, необходимо сказать и об интеграции таких систем в «промышленный интернет вещей» для удобного управления, построения цифровых

моделей и прогнозирования состояния с использованием возможностей искусственного интеллекта.

В настоящее время для создания современной системы стационарного вибромониторинга на базе кафедры «Технологии металлов в нефтегазовом машиностроении» УГНТУ ведутся следующие работы:

1. Собираются и анализируются статистические данные по видам и причинам отказов машинного оборудования на производственных предприятиях.

2. Изучаются современные методы и средства построения систем мониторинга.

3. Ведется разработка беспроводного датчика вибрации, способного автономно и с минимальным энергопотреблением передавать данные вибрации машинного оборудования.

4. Ведется создание и настройка программного обеспечения на базе облачных сервисов одного из крупнейших российских операторов мобильной связи.

Подбор физико-механических характеристик датчиков вибрации осуществлялся с целью выбрать наиболее оптимальное решение с точки зрения цена/качество, а также наиболее надежную и простую схему построения конечной действующей модели продукта.

В ходе рассмотрения возможных вариантов было приобретено и протестировано около 20 всевозможных датчиков вибрации. Некоторые примеры этих датчиков приведены на рис. 1.

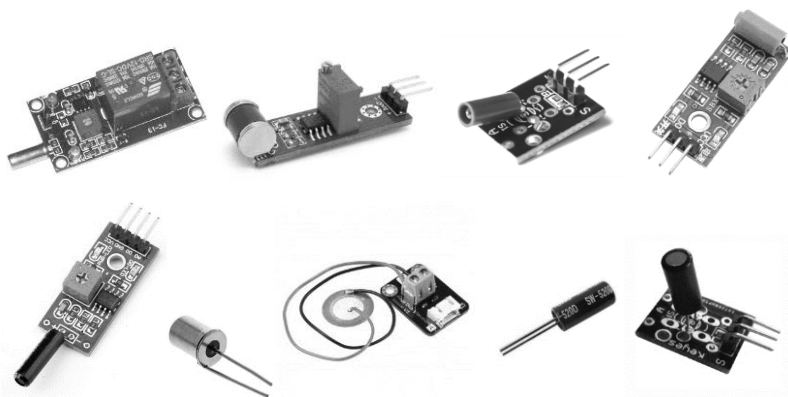


Рис. 1. Датчики вибрации

Были рассмотрены и варианты датчиков вибрации классической компоновки, приведенной на рис. 2.

При проведении стендовых испытаний на лабораторной установке выяснилось, что наиболее подходящими из протестированных являются пружинные образцы.

Датчики на основе пружины наиболее стабильны по характеристикам, просты и надежны. Не требуют какой-либо начальной настройки, калибровки. Образцы, состоящие из стержня, окруженного пружиной (рис. 3), подходят для такой системы больше всего еще и потому, что при помощи изменения жесткости пружины можно получить разные характеристики для различных типов и мощностей оборудования, а также различных предельно допустимых уровней вибрации.

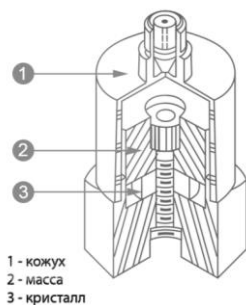


Рис. 2. Классическая схема датчика вибрации

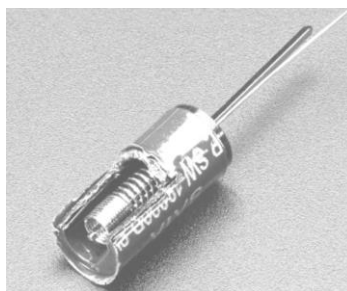


Рис. 3. Внутреннее устройство датчика с пружиной

При выборе способа и протокола беспроводной передачи данных учитывались следующие основные параметры:

1. Ограниченное количество передаваемых данных.
2. Максимально возможная автономная работа (питание от встроенного элемента питания) датчика при минимально-возможном энергопотреблении.
3. Возможная дальность работы на удалении 100–3 000 м от приемного устройства.
4. Канал передачи данных, датчики и приемные устройства должны быть помехоустойчивы и пожаробезопасны.
5. Создаваемая система интегрируется в «промышленный интернет вещей».

Наиболее подходящими для этих целей на сегодня являются сети LPWAN.

Следует отметить большую перспективу исследований в области контроля технического состояния машинного оборудования в ключе снижения эксплуатационных затрат и создания цифровых моделей предприятий для прогнозирования развития событий при помощи искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман А.А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.А. Ширман, А.С. Соловьев // Библиотека машиностроителя. – М., 1996. – 436 с.
2. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. – СПб.: Севзапучцентр, 2013. – 120 с.
3. Барков А.В. Методика диагностирования механизмов с электроприводом по потребляемому току. – СПб.: Севзапучцентр, 2012. – 384 с.
4. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: учеб. пособие. – СПб.: Севзапучцентр, 2013. – 467 с.
5. Болотин В.В. Вибрации в технике. – М.: Машиностроение, 1999. – 274 с.
6. Зусман Г.В. Вибродиагностика: учеб. пособие. – М.: Спектр, 2011. – 567 с.
7. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. – М.: Машиностроение, 2003. – 645 с.
8. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Новосибирск: СО РАН, 2014. – 286 с.
9. Микита Г.И. Виброакустическая диагностика. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2003. – 372 с.
10. Пронин С.П. Теоретические основы оптических методов измерения и контроля параметров гармонической вибрации / С.П. Пронин, Е.А. Зрюмов, П.А. Зрюмов. – Барнаул: Изд-во АлгГТУ, 2011. – 276 с.
11. Розенберг Г.Ш. Вибродиагностика / Г.Ш. Розенберг, Е.З. Мадорский, Е.С. Голуб. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 423 с.
12. Азовцев Ю.А. Вибрационная диагностика роторных машин и оборудования целлюлозно-бумажных комбинатов / Ю.А. Азовцев, Н.А. Баркова, А.А. Гаузе. – СПб.: СПбГТУРП, 2014. – 246 с.

УДК 621.3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИЛОВОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.А. Поздеева, Н.А. Висков, Н.Ш. Фазилова, студенты

Научный руководитель В.И. Апасов, доцент каф. ПрЭ

Проект ГПО ПрЭ-2305. Преобразователь напряжения с цифровым управлением для автоматической системы электропитания г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, pozdeevam331@gmail.com, vovaap@mail.ru

Целью данной работы являются проектирование, моделирование и создание макета печатной платы повышающего преобразователя напряжения на печатной плате, а также монтаж схемы.

Ключевые слова: повышающий преобразователь напряжения, моделирование, разводка печатной платы, монтаж элементов на печатной плате.

В состав любого космического аппарата входит система электропитания, структуру которой мы подробно рассмотрели в предыдущих статьях [1, 2]. В данной статье будут представлены результаты реализации экспериментального макета силового модуля.

Для создания печатной платы была выбрана программа Altium Designer. Altium Designer – это система автоматизированного проектирования (САПР), созданная Altium LLC, которая представляет собой программную платформу профессионального уровня для проектирования печатных плат и электронных изделий от этапа создания схемы электрической принципиальной до трассировки и 3D-модели готового прибора.

На рис. 1 представлены печатная плата разрабатываемого устройства и экспериментальный макет силовой части модуля системы электропитания на основе повышающего преобразователя напряжения.

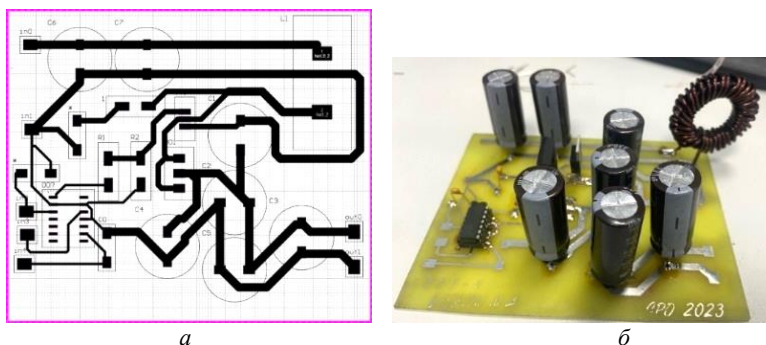


Рис. 1. Печатная плата силовой части модуля системы электропитания (а) и экспериментальный макет (б)

На рис. 2 даны экспериментальные зависимости передаточной и регулировочной характеристики. Проведено исследование работы устройства.

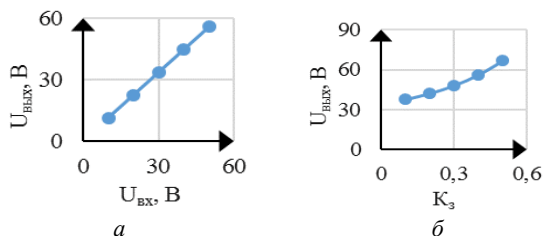


Рис. 2. Передаточная характеристика при $K_3 = 0,1$ (а) и регулировочная при $U_{\text{ВХ}} = 35$ В (б)

На рис. 3 приведена схема электрическая принципиальная силовой части разрабатываемого модуля.

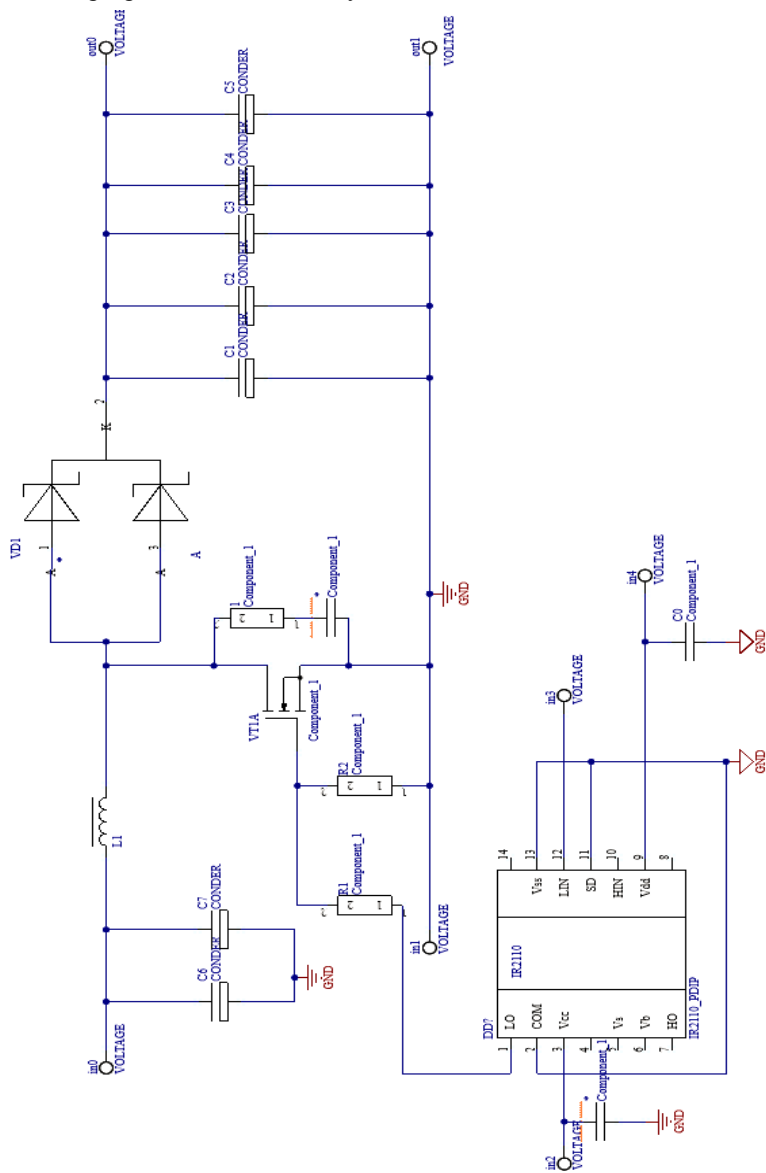


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная силовой части модуля системы электроснабжения

На рис. 4 даны сканы осциллограмм, полученные на выходе.



Рис. 4. Осциллограммы напряжений на истоке VT1 (верхняя) и на выходе 1 DD7 (нижняя) при $K_3 = 0,1$ (а) и $K_3 = 0,5$ (б)

В результате проделанной работы было проведено экспериментальное исследование силового модуля, а также верифицирована его имитационная модель путем сравнения экспериментальных данных, полученных ранее при имитационном моделировании, с данными практического эксперимента. В дальнейшем планируется продолжить создание цифровой системы управления, обеспечивающей улучшенные параметры и имеющие меньшие массогабаритные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Висков Н.А. Системы электропитания МКА для ГСО. Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения / Н.А. Висков, А.П. Безменников, П.А. Болотников // Матер. XII регион. науч.-практ. конф., Томск, 2023. – Томск: ТУСУР, 2023. – 857 с.
2. Поздеева М.А. Система электропитания космического аппарата (СЭП КА). Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения / М.А. Поздеева, Н.Ш. Фазилова, Я.С. Штанько // Матер. XII регион. науч.-практ. конф., Томск, 2023. – Томск: ТУСУР, 2023. – 857 с.
3. Соустин Б.П. Системы электропитания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 1994. – 318 с.
4. Абламейко С.В. Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютер. технологий, мех.-мат. и геогр. / С.В. Абламейко, В.А. Саечников, А.А. Спиридонов. – Минск: БГУ, 2012. – 159 с.

**СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ
ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОЙ
МОЩНОСТИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ДУГИ**

*А.Д. Щетинин, студент каф. ПрЭ;
В.О. Оскирко, к.т.н., н.с. ИСЭ СО РАН;
С.М. Кривых, Е.А. Шилов, инженеры
ООО «Прикладная Электроника»
г. Томск, ТУСУР, shetinin_14@mail.ru*

Настоящая работа посвящена описанию структурной схемы и принципа действия разработанного генератора коротких импульсов высокой мощности для питания дугового разряда в источнике электронов с плазменным эмиттером. Формирование импульсов высокой мощности происходит в результате разряда накопительного конденсатора после формирования высоковольтного импульса иницирования дуги.

Ключевые слова: электронно-лучевой источник, генератор импульсов, вакуумная дуга, плазменный эмиттер.

Электронно-лучевые источники с плазменным эмиттером – это устройства, в которых электроны извлекаются из плазмы и ускоряются электрическим полем [1–3]. Они используются для обеспечения теплового воздействия на поверхность изделий, которое влечет за собой модификацию свойств поверхности. Параметры потока электронного пучка зависят от характеристик эмиссионной плазмы. Для формирования высококонцентрированных потоков электронов требуется плазма высокой плотности, которую удается достичь с помощью эмиттеров на основе дугового разряда.

Данная работа является продолжением исследований [4], посвященных созданию генератора коротких импульсов высокой мощности для питания дуги в электронно-лучевом источнике с плазменным эмиттером. Амплитуда импульсов тока на выходе генератора должна достигать несколько кА при длительности 5–10 мкс. На данной стадии реализован макет генератора импульсов. В данной работе рассматриваются его структурная схема и принцип действия.

На рис. 1 представлена структурная схема генератора импульсов. Он включает в себя канал зарядки накопительных конденсаторов (элементы 2–6), канал иницирования дугового разряда (элементы 7–10) и систему управления 1. При этом структурную схему генератора можно разделить на две части: входная часть, подключаемая к сети, и выходная часть, обладающая высоковольтной изоляцией. Высоко-

вольтная изоляция выходной части генератора необходима для работы плазменного эмиттера под высоким ускоряющим напряжением.

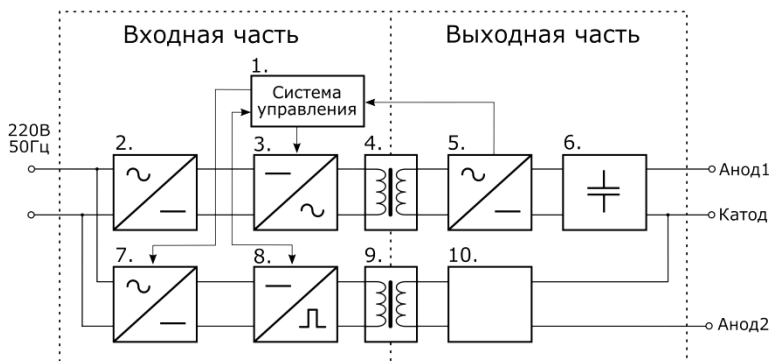


Рис. 1. Структурная схема генератора коротких импульсов высокой мощности для питания дуги в плазменном эмиттере электронно-лучевого источника

Переменное сетевое напряжение поступает на неуправляемый выпрямитель 2 в канале зарядки накопительных конденсаторов. Выпрямленное напряжение поступает на вход инвертора 3, который преобразует его в переменное напряжение с частотой 30 кГц. Далее следует разделительный повышающий трансформатор 4, обеспечивающий высоковольтную изоляцию до 30 кВ. Переменное напряжение с выхода трансформатора 4 поступает на вход выпрямителя 5, через который производится зарядка накопительных конденсаторов 6 до необходимого напряжения. Уровень напряжения накопительных конденсаторов контролируется с помощью датчиков системой управления 1, которая формирует управляющие импульсы для инвертора 3. Отрицательный полюс накопительного конденсатора подключается к катоду разрядной системы, а положительный соединяется с анодом 1. Амплитуда импульсов дуги регулируется путем изменения напряжения накопительных конденсаторов.

На входе канала инициирования дугового разряда располагается управляемый выпрямитель 7, который регулирует выходное напряжение. Далее следует формирователь импульсов 8. Импульсы с формирователя поступают на вход повышающего разделительного трансформатора 9, после чего следует умножитель напряжения 10. Умножитель напряжения увеличивает амплитуду импульсов до 10 кВ. Отрицательный выход умножителя 10 подключается к катоду разрядной системы, положительный выход подключается к аноду 2, используемого для инициирования дугового разряда. Инициирование дуги в

основном канале происходит после формирования высоковольтного импульса между электродами катод–анод 2. В результате формирования высоковольтного импульса на катоде образуется катодное пятно, происходит испарение материала и возрастает проводимость промежутка катод–анод 1. На рис. 2 представлены фотографии изготовленного генератора импульсов для питания импульсного дугового разряда.



Рис. 2. Внешний вид генератора коротких импульсов высокой мощности для питания импульсного дугового разряда

Заключение. В работе представлено описание устройства и принципа действия изготовленного макета генератора коротких импульсов высокой мощности. В схеме используется канал иницирования дуги, обеспечивающий формирование импульсов напряжения до 10 кВ. Для формирования коротких импульсов высокой мощности используются накопительные конденсаторы. Амплитуда импульсов тока регулируется путем изменения зарядного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, A.B. Markov, D.S. Nazarov, V.A. Shulov, Yu.F. Ivanov, R.G. Buchheit // J. Vac. Sci. Technol. A, Vac. Surf. Films. – 2001. – Vol. 16. – P. 2480–2488.
3. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применение. – Томск: НТЛ, 2005.
4. Генератор сильноточных импульсов тока вакуумной дуги амплитудой до 5 кА / А.А. Шадрин, В.О. Оскирко, П.В. Москвин и др. // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР: в 3 ч. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – № 1. – С. 289–291.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСВЯЗАННЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ В ПРОГРАММЕ COMSOL®

А.В. Хворостова, студентка

Научный руководитель А.В. Осипов, доцент каф. ПрЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, hvor.na22@gmail.com

Представлены численный расчет и анализ системы, представляющей собой два индуктивно связанных контура на основе двух планарных катушек, реализованных в программе COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: взаимная индуктивность, беспроводная передача энергии, коэффициент связи, взаимная индуктивность.

Системы беспроводной передачи энергии, базированные на явлении электромагнитной индукции, обрели наибольшее распространение при конструировании катушек в виде планарных обмоток, так как они имеют малые габариты. При проектировании данных конструкций важно точно рассчитать индуктивность, активное сопротивление, коэффициент связи между катушками. Определение этих параметров необходимо для построения классической Т-образной эквивалентной схемы связанных катушек, на основе которой можно проводить имитационное моделирование.

Два контура являются связанными, когда первичный и вторичный контуры обладают общим магнитным потоком, который создает напряжение на вторичном контуре за счет взаимной индуктивности. Степень взаимного воздействия контуров характеризуется коэффициентом индуктивной связи. Коэффициент связи зависит от расстояния между катушками, соотношения их диаметров, расположения, формы. Параметры можно определить путем измерения индуктивности первичной катушки в двух случаях: с разомкнутым и замкнутым вторичным контуром.

Для оценки магнитной связи разработана модель на основе двух медных планарных катушек спиральной формы, расположенных соосно и окруженных воздушной областью. Исследуемая модель имеет параметры: количество витков $W = 4$ витка; расстояние между витками $h = 5$ мм, толщина провода $d = 5$ мм; внешний радиус $r = 6$ см.

Получены результаты расчета импеданса одной катушки: индуктивность $L = 1,5$ мкГн, активное сопротивление $R = 37$ мОм. При включении в электрическую цепь первичной катушки источника переменного напряжения $V_1 = 10$ В с частотой $f = 500$ кГц при разных нагрузках R_1 получены результаты распределения магнитного поля.

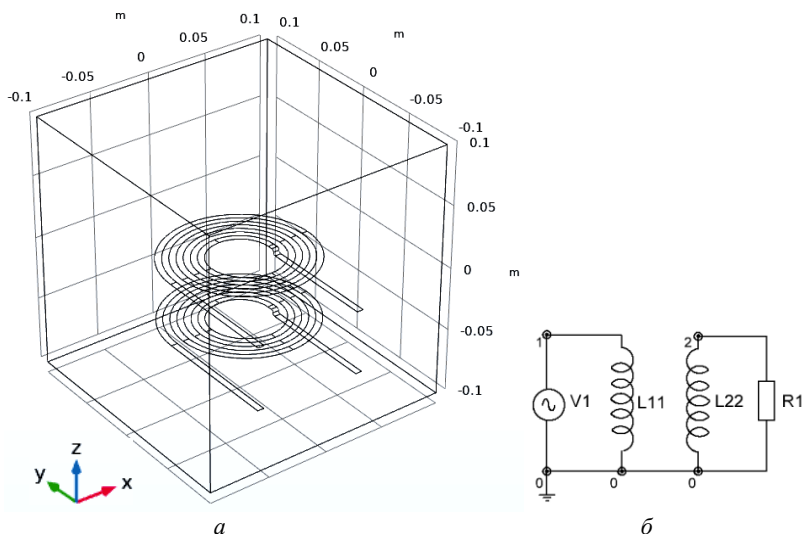


Рис. 1. Геометрия двух планарных катушек (а), система индуктивно связанных контуров (б)

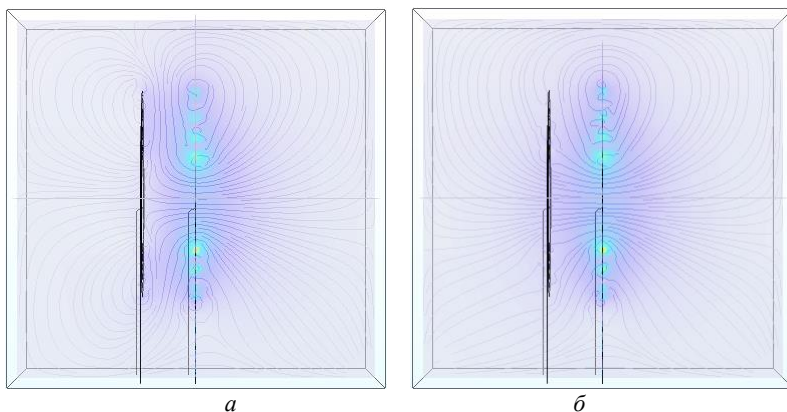


Рис. 2. Распределение магнитного поля, полученное в программе COMSOL при $l = 30$ мм: $R1 = 10$ мОм (а); $R1 = 10$ МОм (б)

Как видно из рисунка, распределение магнитного поля обладает симметрией относительно центра катушек и зависит от нагрузки вторичного контура. При этом большая часть силовых линий первичного контура замыкается, не охватывая вторичный, образуя поток рассеяния. Для численной оценки проведено моделирование системы на

основе двух связанных контуров и получена зависимость параметров катушек от расстояния между ними.

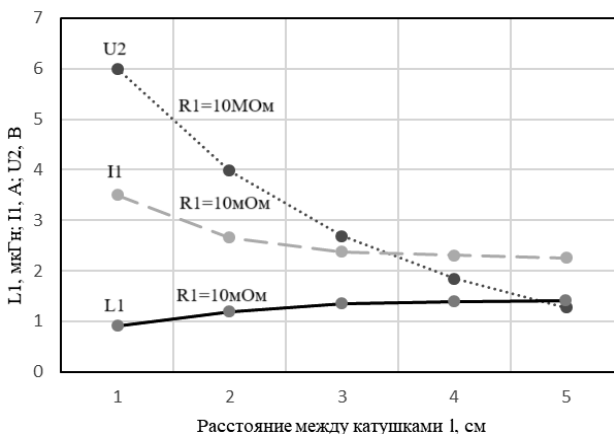


Рис. 3. Зависимость параметров катушек индуктивности от расстояния между катушками при различных состояниях электрической цепи

По мере удаления контуров друг от друга основной поток магнитного поля рассеивается и не охватывает силовыми линиями вторичный контур. Закорачивание контура ($R = 10 \text{ мОм}$) приводит к уменьшению индуктивности первичной катушки за счет наведения тока на вторичный контур. При минимальном расстоянии между катушками передача напряжения на вторичный контур 60%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maximum Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems with Dynamic Coupling Coefficient Estimation / Xin Dai, Xiaofei Li, Yanling Li, Aiguo Patrick Hu // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, No. 6. – P. 5005–5015.
2. A Splitting Frequencies-Based Wireless Power and Information Simultaneous Transfer Method / Jin-Guk Kim, Guo Wei, Man-Ho Kim, Hyok-Su Ryo // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 65, No. 12. – P. 4434–4445.
3. Богач Н.В. Анализ магнитных полей плоских излучателей / Н.В. Богач, А.Н. Никишенко. – 3-е изд. – М.: Радиоэлектроника и информатика, 2010. – 46 с.
4. Сайт компании разработчика пакета COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.comsol.com>, свободный (дата обращения: 09.03.2024).

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1 РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Подсекция 1.1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

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

Г.А. Калашиков, Д.Д. Зайков

Макет модуля связи БПЛА на базе SDR-платформы 31

К.Д. Зайков

Обзор специализированных пакетов программ моделирования
и анализа АФАР 34

И.С. Гозадзе

Анализ влияния осадков на интегральное влагосодержание,
температуру и абсолютную влажность воздуха в г. Новосибирске 37

Е.Д. Морозов, М.Е. Ильясов, А.В. Зяблицев

Радиовысотомерная система для обеспечения посадки
первой ступени ракеты-носителя 41

М.Е. Ильясов, Е.Д. Морозов, А.В. Зяблицев

Разработка метода предобработки базы данных для повышения
эффективности классификации при помощи полносвязной нейросети
на примере радиолокационных данных трасс воздушных объектов 44

Подсекция 1.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Председатель – Озёркин Д.В., декан РКФ, к.т.н.;
зам. председателя – Понамарев Д.Е., преп. каф. КИПР

А.С. Назаров

Разработка и запуск системы вакуумной откачки
для электронно-пучковой установки 47

Е.В. Виноградова, Н.С. Размахов, В.Ш. Рахимов, М.А. Юдин

Анализ качества интегральных микросхем серии 1564 различных
производителей с использованием комплекса методов оценки 51

И.Е. Тарханов

Повышение технологичности блоков космической аппаратуры
путем применения решетчатых несущих конструкций 55

И.А. Жучков, Д.А. Гордеева Синтез цифрового фильтра для приёмной части PLC-модема с двухчастотной FSK-модуляцией	58
---	----

Подсекция 1.3

РАДИОТЕХНИКА

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

С.В. Шафран, М.А. Советкина Метод прямого измерения разности фаз навигационных сигналов	62
Д.В. Ленкова, Г.А. Таразанов, Н.Н. Раульев Реализация модели системы передающей части сигнала с использованием BPSK-модуляции в GNU Radio	65
А.Р. Зобов, В.В. Бричковский Программно-аппаратная модель системы синхронизации несущей частоты QPSK-модуляции.....	68

Подсекция 1.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

С.Е. Бояркин, К.Р. Мусакаева Построение карт движения медицинских инструментов в процессе проведения операции	71
А.К. Ерболат Анализ алгоритмов машинного обучения для обработки изображений....	74
А.К. Мовчан, В.В. Капустин, И.Д. Мусихин, А.А. Тисленко Кодирование импульсов излучения и стробирования в активно-импульсных телевизионных измерительных системах	77
И.Д. Мусихин, С.А. Забуга, В.В. Капустин, Е.С. Познахареv Экспериментальное исследование контрастности изображений активно-импульсной телевизионной измерительной системы в неоднородных оптических средах распространения излучения.....	81
Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов История технического зрения. К 90-летию со дня рождения И.Н. Пустынского	85
Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов Особенности видеонаблюдения в сложных условиях	88
Л.А. Литохин Автоматическое обнаружение хирургических инструментов робота Da Vinci на видеозаписях операций	91

И.А. Романтеев, А.В. Каменский	
Анализ использования моделей нейронных сетей разной архитектуры для детекции летательных аппаратов	95
К.С. Куприянова, К.А. Рылов, М.И. Курячий	
Разметка данных для обучения нейросетей распознаванию медицинских инструментов	99
А.А. Шмырёва, В.И. Пермяков	
Реализация программы применения методов восстановления изображений	103
А.А. Филимонцева, П.П. Снетков	
Программный модуль обработки изображений в частотной области	107
С.А. Забуга, И.Д. Мусихин, В.В. Капустин	
Датчики построения карт глубин пространства	111

Подсекция 1.5

СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

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

Н.Г. Калашикова, Е.В. Ломаков, К.В. Диноченко	
Формирование и обработка сигналов с линейной частотной модуляцией при наличии ошибок временной и частотной синхронизации в канале с частотно-селективными замираниями	116
К.В. Диноченко, Е.В. Рогожников, Н.Г. Калашикова	
Устранение спектральных искажений в спектре сигналов с линейной частотной модуляцией с целью повторного использования частотного диапазона	119
Р.А. Порваткин	
Разработка модели обнаружения PRACH-сигнала GSM 900	121
Г.Н. Шалин, А.С. Шинкевич, Д.А. Покаместов	
Анализ исправляющей способности полярных кодов для заданной вероятности битовых ошибок	124
К.А. Труханенко	
Применение расширения спектра в системе ММО Аламоути	127

Подсекция 1.6

РОБОТОТЕХНИКА

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

Р.А. Емельянов, З.В. Рыжакин	
Применение технического зрения в медицинских роботах	131
Д.А. Дашкевич, А.А. Изюмов, В.П. Коцубинский	
Система идентификации фракции зернистых сыпучих материалов	133

<i>А.М. Пасюков, Д.Д. Левченко, А.Х.А. Сундуй,</i> <i>К.В. Бесфамильный, А.И. Ангаров, А.А. Зотов</i>	Роботизированный кран.....	137
<i>Д.К. Зацепин</i>	Оптимизация траектории с учетом области видимости для применения в аэронавигационном слежении	139

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.

<i>Д.В. Борисов, А.А. Коколов</i>	Разработка буферного усилителя S-диапазона на основе КМОП-технологии	144
<i>К.Е. Шушарина, Ф.И. Шеерман, А.А. Коколов</i>	Разработка интегрального датчика температуры на основе отечественной КМОП-технологии	149

СЕКЦИЯ 2 ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Подсекция 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

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

<i>А.А. Кобызева</i>	Использование ФПГ для оценки состояния водителей транспортных средств	155
<i>С.С. Сафонов, А.В. Кинах</i>	Разработка ПО для автоматизированного измерения вольт-фарадных характеристик СИД.....	158
<i>А.С. Степанова, И.А. Колупаев, Р.В. Василицев</i>	Исследование спектров фотолюминесценции кристаллов СИД на основе GaN	161
<i>Д.Д. Кривошеина, И.А. Колупаев, Е.В. Парехина</i>	Исследование спектров фотолюминесценции гетероструктур с множественными квантовыми ямами на основе InGaN/GaN.....	164

Д.С. Медведев	
Обзор методов оценки частоты пульса, дыхания и двигательной активности человека во сне в устройствах персонального мониторинга здоровья.....	167
А.В. Неустров	
Программное обеспечение для устройства бесконтактной диагностики и профилактики стрессовых состояний человека	169

Подсекция 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – Лоцилов А.Г., проректор по НРиИ,
зав. каф. КУДР, к.т.н.;*

зам. председателя – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.

Т.А. Ченко, Е.В. Санников, Г.А. Малютин	
Математическая модель фильтра неотражающего типа на связанных полосковых линиях с неодинаковыми нагрузками, формирующими частотную характеристику.....	174
Д. Горобец	
Четырёхканальный ультразвуковой дефектоскоп	178
А.В. Сагдиев, Е.И. Тренкаль	
Циклический синхронизатор стробоскопической измерительной системы	181
А.С. Нечаев, И.Е. Тоскина	
Подход к описанию термограмм вейвлет-функциями.....	184
В.А. Фасхудинова, Д.Е. Миненко	
Применение щелевого цилиндрического резонатора для измерений диэлектрических свойств твердых диэлектриков в СВЧ-диапазоне	186
А.В. Берестов, Е.И. Тренкаль	
Разработка СВЧ-перехода измерительного зонда уровнемера.....	190
Я.А. Петененко, В.С. Поздняков, Е.И. Тренкаль	
Алгоритм расчета диэлектрической проницаемости материалов фазовым методом в условиях рассогласованности.....	193
Р.С. Саразов, А.А. Коробков	
Концепция портативной измерительной установки для оценки электромагнитной обстановки и исследования радиосигналов.....	196
И.В. Крузе, Е.И. Тренкаль	
Моделирование формирователя строб-импульсов на основе структуры с щелевым резонатором	199
А.С. Меркулова, Н.С. Нефедов	
Разработка тестовой платы для определения технологических возможностей принтерной печати ГИС.....	202

Е.А. Самардакевич, В.С. Поздняков, Е.И. Тренкаль Разработка генератора сверхкоротких импульсов на парных ДНЗ-диодах.....	205
С.Ю. Василенко Применение имитаторов конечных устройств для тестирования сети SpaceWire.....	209
С.С. Журавлев, Н.О. Кузьмин, В.А. Трубоченинов, А.А. Киселева Математическая модель ретранслятора спутника связи	213

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.А. Горелов, А.В. Картуков Способ оценки диаграммы направленности антенны РЛС с помощью матрицы плазменных образований	216
А.С. Кузьмин, Т.В. Лузина, А.С. Терехова Зондовая микроскопия нанометровых пленок ИТО	219
А.В. Казаков, А.С. Климов, А.А. Лыман Обработка керамики из диоксида циркония импульсным форвакуумным плазменным источником электронов	222

Подсекция 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н.;
зам. председателя – Оскирко В.О., н.с. лаборатории прикладной
электроники ИСЭ СО РАН, технический директор
ООО «Прикладная электроника», к.т.н.;
Михальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.

А.И. Бартнев, В.Д. Семенов Система электропитания мобильного комплекса радиосвязи	226
И.А. Чернецкий, В.Д. Семенов Имитационная модель активного выпрямителя напряжения для мобильного комплекса энергоснабжения	229
К.Ж. Калжанов, В.Д. Семенов Моделирование активного выпрямителя напряжения в среде MatLab Simulink.....	233
Д.А. Кудяков Моделирование активного фильтра высоковольтного источника питания ФЭУ	237

К.А. Редлих, В.Д. Семенов Силовая ячейка понижающего DC/DC-преобразователя модульного типа для блока стабилизации и регулирования напряжения генераторной системы электроснабжения автономных объектов.....	241
К.А. Ахтырский, В.А. Кабилов, В.Д. Семенов Система электропитания с изменяемым числом унифицированных автономных модулей	244
П.А. Стрельников, В.Д. Семенов Управление одноключевым трехфазным активным корректором коэффициента мощности	248
Э.В. Ефремова, А.А. Арыстанбеков, Д.А. Товмасын Устройство контроля и преобразования параметров автономных систем электропитания со сниженными массогабаритными характеристиками для аэрокосмического приборостроения	252
П.Е. Канаков, Н.С. Легостаев Цепи коррекции в контуре обратной связи импульсных источников питания	254
П.Е. Канаков, Н.С. Легостаев Особенности конструкции высокочастотных преобразователей постоянного напряжения	257
И.П. Киселев, Н.С. Легостаев Комплекс измерительно-вычислительный для системы измерения количества и показателей качества газа	260
В.С. Коробкова, Н.С. Легостаев Имитационная модель автономной ветроэнергетической установки в программной среде MATLAB Simulink	263
А. Нурханов, М.М. Поддубный, Д.Е. Корчагин Исследование трехпортового резонансного LLC-преобразователя	269
М.Г. Тимошенко Модуль контроля и управления литий-ионной аккумуляторной батареей	271
И.В. Цвинтарный, Н.И. Чумаков, А.В. Чирков, В.С. Халюк Применение электротехнической стали в целях снижения массогабаритных показателей систем электропитания малого космического аппарата	274
А.А. Устюгов Исследование зарядного устройства аккумуляторной батареи асимметричным током	278
А.Ю. Вильгельм, Н.А. Савочкин Схема запуска энергопреобразующего устройства от резервного источника питания	282
И.В. Зелинский, Н.С. Легостаев Фазовая автоподстройка частоты для установок индукционного нагрева	286
В.И. Карягин Устройство для управления MOSFET-транзисторами в силовых преобразователях	289

<i>А.Д. Гончаров</i>	
Моделирование резонансного LCL-преобразователя в режиме стабилизации тока.....	292
<i>А.С. Меркушев, Д.Ф. Габбасов</i>	
Проектирование стационарной системы вибромониторинга машинного оборудования	295
<i>М.А. Поздеева, Н.А. Висков, Н.Ш. Фазилова</i>	
Исследование работы силового модуля системы электроснабжения малого космического аппарата.....	298
<i>А.Д. Щетинин, В.О. Оскирко, С.М. Кривых, Е.А. Шилов</i>	
Структурная схема и принцип действия генератора коротких импульсов высокой мощности для питания дуги	302
<i>А.В. Хворостова</i>	
Моделирование магнитосвязанных индуктивностей в программе COMSOL®	305

Научное издание

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

**По материалам
международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2024»**

15–17 мая 2024 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Сдано на верстку 20.05.2024. Подписано к печати 25.06.2024.
Формат 60×84^{1/16}. Печать трафаретная. Печ. л. 19,75
Тираж 100 экз. Заказ 3.

Издано ТУСУР (заказчик)
г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24
Тираж отпечатан в типографии ТУСУРа
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Ред.-изд. подготовка оригинал-макета в эл. виде
В-Спектр (ИП Бочкарева В.М., исполнитель)
ИНН 701701817754
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24,
тел. 8-905-089-92-40, эл. почта: bvm-1@list.ru