

A worker in a yellow hard hat and dark uniform is seen from behind, holding a tablet. In the background, a yellow robotic arm is visible in an industrial setting.

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2024. ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»



Сборник материалов
XX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 4–6 декабря 2024 года)

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова»

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2024. ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов
XX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 4–6 декабря 2024 года)



Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2025

УДК 681.2(06)
П75

Ответственные за выпуск

А. Е. Кайсин, отв. редактор, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

С. А. Мурашов, отв. редактор, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

В. А. Глушков, науч. редактор, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

В. В. Муравьев, науч. редактор, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

В. В. Соболев, науч. редактор, д-р физ.-мат. наук, проф., декан факультета «Математика и естественные науки», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

В. В. Хворенков, науч. редактор, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

И. В. Штенников, науч. редактор, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

П75

«Приборостроение в XXI веке – 2024. Интеграция науки, образования и производства» : сборник материалов XX Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 4–6 дек. 2024 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – 349 с. – 19,8 МБ (PDF). – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7526-1069-1

В рецензируемый сборник включены статьи по материалам докладов XX Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», проходившей с 4 по 6 декабря 2024 года в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова. Рассматривается широкий круг научных и технических вопросов в области электронного приборостроения, конструирования и производства электронных средств, электротехнических систем и комплексов, неразрушающего контроля качества и диагностики, радиотехники, телекоммуникаций, информационных технологий, прикладных методов физики и математики.

Издание предназначено для специалистов в области приборостроения, ученых, аспирантов, студентов.

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-1069-1

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025
© Оформление. Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова, 2025

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

А. В. Губерт, председатель организационного комитета, канд. техн. наук, и. о. ректора ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. Н. Копысов, зам. председателя, канд. техн. наук, проф., проректор по научной и инновационной деятельности;

А. Е. Кайсин, зам. председателя, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, отв. организатор конференции;

С. А. Мурашов, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», отв. организатор конференции;

О. А. Дегтева, канд. экон. наук, доц., начальник управления науч.-исслед. работ;

А. П. Тюрин, зам. председателя, д-р техн. наук, проф., зам. начальника управления науч.-исследоват. работ;

В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», рук. секции 1;

И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», рук. секции 2;

В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», рук. секции 3;

О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф., кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», рук. секции 3;

В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Радиотехника», рук. секции 4;

В. В. Соболев, д-р физ.-мат. наук, проф., декан факультета «Математика и естественные науки», рук. секции 5;

Ю. К. Шелковников, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник УдмФИЦ УрО РАН

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

А. Е. Кайсин, председатель, канд. техн. наук, доц., декан приборостроительного факультета, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

С. В. Ленков, д-р техн. наук, зав. лабораторией, гл. науч. сотр. УдмФИЦ УрО РАН;

В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

В. В. Соболев, д-р физ.-мат. наук, проф., декан факультета «Математика и естественные науки», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф., зав кафедрой «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Ю. П. Демаков, канд. физ.-мат. наук, проф. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Е. М. Зайцева, канд. пед. наук, доц. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Д. В. Злобин, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

С. В. Клишин, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

С. А. Мурашов, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

И. М. Новоселов, канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. В. Платунов, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Б. И. Сибгатуллин, канд. техн. наук, доц. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

В. А. Сидорина, канд. пед. наук, доц. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

М. А. Синцов, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

В. А. Стрижак, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. А. Зыкин, ст. преп. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

О. Я. Шамсиахметов, ст. преп. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. Л. Владыкин, ассистент кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

К. Ю. Белослудцев, аспирант, инженер-лаборант кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

ПАРТНЕРЫ



Минцифра УР



Минпромторг УР

**ГАЗПРОМБАНК****акметрон**

Вершина измерений

**МЦД**
моделирование и
цифровые двойники**FIDESYS**Удмуртский федеральный
исследовательский центр
УРО РАН

Содержание

Секция 1. Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение

<i>Абашев К. Р., Беляева С. Н., Глушков В. А.</i> Получение фото- и видеоизображения с полезной нагрузки лабораторного макета спутника формата CubeSat	10
<i>Владыкин Д. И.</i> Эффективность систем автоматического управления для солнечных элементов с дифференциальным расположением	20
<i>Воронин Д. А., Князев И. В., Ушаков П. А.</i> Экспериментальная проверка хаотической системы на основе цепи Чуа дробного порядка	25
<i>Гатценбиллер А. И., Шамсиахметов О. Я.</i> Особенности адаптации программных кодов скриптовых сценариев в современных браузерах	29
<i>Чумаков В. В.</i> Методические аспекты моделирования и проектирования космических миссий в рамках реализации рабочей программы дисциплины «Радиотехника и электроника в космосе»	36

Секция 2. Электротехнические системы и комплексы

<i>Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю.</i> Резонансный двунаправленный непосредственный DC-AC преобразователь	42
<i>Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю.</i> Система беспроводной зарядки с функцией балансировки напряжения элементов батареи	47
<i>Морозов А. В., Федоров Я. В.</i> Моделирование универсальной системы питания бортовой сети беспилотного летательного аппарата на основе активного выпрямителя	51
<i>Тюлькин М. В., Галеев Р. И.</i> Разработка лабораторного стенда по изучению программируемого реле Zelio Logic	57

Секция 3. Физические методы и приборы измерений, контроля, диагностики

<i>Аль Уатик Х. С., Пронин С. П.</i> Сравнительный анализ моделей глубокого обучения для диагностики редукторов ветряных турбин	65
<i>Ашихмин Д. И.</i> Выбор аппаратной платформы для макетирования высокоскоростного акустического дефектоскопа прутков, реализующего зеркально-теневой метод на многократных отражениях	70
<i>Баранов А. Д., Попкова Е. С., Староверова Я., Шевелько М. М.</i> Автоматизированное устройство для измерения параметров пьезопреобразователей	79
<i>Белослудцев К. Ю., Владыкин А. Л., Ефремов А. Б., Кузьмин А. С.</i> Информативные параметры акустического контроля пружинной проволоки в условиях ее автоматического сканирования	84

<i>Блинова А. В.</i> Оценка влияния растягивающей нагрузки на скорость акустической волны в листах терморасширенного графита.....	89
<i>Богдан О. П., Загвоздкин П. В.</i> Исследование влияния внешнего растягивающего напряжения на акустические свойства пенополиэтилена.....	94
<i>Вечёра М. С., Коновалов С. И., Коновалов Р. С., Цаплев В. М.</i> Исследование влияния формы демпфера на эффективность работы ультразвукового преобразователя.....	102
<i>Владыкин А. Л., Муравьев В. В.</i> Оценка акустических свойств в дисперсионно-твердеющей стали, изготовленной методом аддитивной технологии.....	108
<i>Волкова Л. В., Кондаков А. А., Петров Д. А.</i> Исследование акустической анизотропии плашек буровых ключей в процессе нагружения и напайки.....	113
<i>Волкова Л. В., Марьин А. Н.</i> Оценка акустической анизотропии магистрального газопровода при испытании на изгиб.....	120
<i>Гордеев Н. В., Сташков А. Н., Матосян А. М., Вишивцев И. В.</i> Микроконтроллерный дифференциальный магнитный структуроскоп для фазового анализа конструкционных сталей.....	127
<i>Денисов Л. А., Белослудцев К. Ю., Муравьева О. В.</i> Влияние температурного воздействия при прохождении акустической волны через пористые среды.....	133
<i>Колпаков К. В., Хозяйкин Г. С., Понькина А. А.</i> Подход к оценке неравномерности толщины стенки листа с использованием нормальных волн в условиях анизотропии свойств.....	139
<i>Матосян А. М., Сташков А. Н., Ничипурук А. П., Гордеев Н. В.</i> Способы улучшения характеристик аппаратуры для оценки механических напряжений в углеродистых сталях.....	144
<i>Муравьева О. В., Белослудцев К. Ю., Хомутов А. С., Торхов К. А., Горбунов В. А.</i> Моделирование процесса распространения акустической волны по сечению трубы с неравномерностью толщины стенки.....	149
<i>Муравьева О. В., Шихарев П. А.</i> Сравнительная оценка затухания крутильной волны в пружине и прямолинейном прутке, изготовленных из пружинной проволоки из стали 54SiCr6.....	155
<i>Пестерев Г. С., Мухаметзянова А. Р., Егоркина С. Б.</i> Концепция создания вибромассажера, настраиваемого на резонансную частоту участка тела человека.....	162
<i>Платунов А. В., Корепанов П. С.</i> О возможности ультразвукового контроля нарушений сплошности капролона эхо-методом.....	167
<i>Савинова Е. В.</i> Сравнительный анализ результатов расчётов задачи термоэлектроупругости для аксиально поляризованной круглой пластины.....	174

<i>Сташков А. Н., Ничипурук А. П., Матосян А. М., Гордеев Н. В., Степина М. С.</i> Методика и аппаратура для задач магнитного неразрушающего контроля одноосных механических напряжений в ферромагнетиках	179
<i>Стрижак В. А., Мурашов С. А.</i> Сравнение результатов расчета акустического эхо-сигнала крутильной волны в трубе от искусственного отражателя, полученных в аналитической и конечно-элементной моделях.....	185
<i>Федорова Н. В.</i> Компьютерное моделирование распространения акустических волн.....	191
<i>Хомутов А. С., Синцов М. А., Пушин П. Н., Буханов В. И.</i> Оценка скорости рэлеевских волн в технологическом цикле производства плунжеров.....	195
<i>Хомутов А. С., Степанова Е. А., Попова В. Д.</i> Неравномерность осевых остаточных напряжений в цилиндре глубинно-штангового насоса	199

Секция 4. Радиотехника, связь, информационные технологии

<i>Владыкин М. И., Коротков А. С., Черных А. К., Булатова Е. Г.</i> Разработка управляемой линии задержки	204
<i>Колмогорова С. С., Бабурин Т. Д.</i> Применение программного обеспечения GNU Radio для разработки систем радиомониторинга на основе программно-конфигурируемого радио	215
<i>Копысов А. Н., Бахмуров Д. С.</i> Разработка микрополосковой патч-антенны для применения в навигационной системе GPS	229
<i>Максимов М. А., Сидорина В. А.</i> Обзор оптимизаций компиляторов для языка программирования C++	237
<i>Махнёв Д. С., Бобров И. К., Булатова Е. Г.</i> Моделирование автоколебательного блокинг-генератора для получения импульсов прямоугольной формы	242
<i>Нельдихин Д. В., Сидорина В. А.</i> Анализ математической модели проводимости электромагнитных волн в проводниках и диэлектриках	250
<i>Никифоров К. А., Булатова Е. Г.</i> Сравнительный анализ переходных характеристик электрических цепей, полученных экспериментально и с использованием программы Micro-Cap.....	256
<i>Новиков М. А., Сенаторов Л. А., Хворенков В. В.</i> Разработка и исследование лабораторного стенда для изучения радиоэлектронного конфликта.....	265
<i>Пестерев Г. С., Зайцева Е. М., Хатбуллин Р. А.</i> Разработка и создание устройства лазерной защиты от БПЛА.....	276
<i>Плешаков Д. И., Арсланов И. А., Булатова Е. Г., Сидорина В. А.</i> Изменение помехоустойчивости ЛЧМ-сигналов при скачкообразной и перекрёстной манипуляции	282
<i>Угузов Д. Р. о., Зайцева Е. М.</i> Использование технологии искусственного интеллекта в системах видеонаблюдения	289

<i>Чаругин В. В., Чаругин В. В., Чесалин А. Н.</i> Дискриминационные и генеративные алгоритмы и их применение в информационной безопасности.....	294
--	-----

<i>Черных А. К., Владыкин М. И., Коротков А. С., Черных К. В., Сидорина В. А.</i> Разработка коммутатора цифровых дискретных сигнальных датчиков	300
--	-----

Секция 5. Физико-математические методы в приборостроении

<i>Веселков И. С., Немцова О. М.</i> Применение симплекс-метода для поиска априори неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения Фредгольма 1 рода	307
---	-----

<i>Гусаров И. Е., Калугин А. И., Антонов Е. А.</i> Параметры однозеркального лазерного сканера, формирующего траекторию в виде фигур Лиссажу.....	312
---	-----

<i>Евдокимов С. Э., Жораев Т. Ю., Щагин А. В.</i> Эффекты квантования по уровню в цифровом фильтре с большой постоянной времени и заданной разрядностью вычислителя	318
---	-----

<i>Кириянов Н. В., Сизиков Ф. А., Гордынец А. С.</i> Методика расчёта шумов инструментального усилителя	322
---	-----

<i>Кочурова Д. Н., Калугин А. И., Антонов Е. А.</i> Зависимость отклонения направления распространения лазерного пучка от влажности воздуха при прохождении неоднородного участка атмосферы	329
---	-----

<i>Осипенко А. И., Баранов П. Ф.</i> Моделирование сварочных процессов методом контрольных объемов	334
--	-----

<i>Соболев В. Вал., Жданова Л. И.</i> Параметры сложной структуры оптических функций гексогонального и аморфного льда.....	340
--	-----

Секция 1. Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение

УДК 629.783

К. Р. Абашев, магистрант

С. Н. Беляева, магистрант

В. А. Глушков , канд. техн. наук, доц.

Е-mail: kra_dept@istu.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Получение фото- и видеоизображения с полезной нагрузки лабораторного макета спутника формата CubeSat

Миниатюризация космических аппаратов и снижение стоимости запуска открывают новые возможности для проведения научных исследований и мониторинга Земли с использованием спутников формата CubeSat. Однако ограниченные ресурсы наноспутника, такие как энергопотребление, объем памяти и вычислительная мощность, предъявляют особые требования к системам получения и обработки изображений. В данной статье рассматриваются методы получения и обработки фото- и видеоизображений с полезной нагрузки лабораторного макета спутника формата CubeSat. Особое внимание уделяется вопросам непосредственной реализации лабораторного макета. Результаты исследования представляют практический интерес для школьников и студентов профильных вузов и могут способствовать повышению уровня знаний в области проектирования космических аппаратов.

Ключевые слова: спутник формата CubeSat, лабораторный макет спутника, получение фото- и видеоизображения, Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi Camera Rev 1.3, Python, конструкция корпуса спутника формата CubeSat.

Введение

Современную жизнь невозможно представить без спутников. Эти космические аппараты оказывают огромное влияние на нашу повседневную жизнь. Они применяются во многих сферах человеческой дея-

тельности: в научных и метеорологических исследованиях, в картографии, в астрономических наблюдениях, в телекоммуникациях и для наблюдения за земной поверхностью [1].

В настоящее время все большую популярность набирают малогабаритные космические аппараты, такие как наноспутник формата CubeSat. Небольшая стандартизированная платформа CubeSat помогает сократить стоимость и время разработки спутников, повысить доступность запусков. На сегодняшний день все больше и больше исследователей находят пользу в этих небольших спутниках. Например, конструкторы от фирмы Introsat [2] уже доказали свою полезность. Одним из направлений использования лабораторного макета спутника является изучение основ проектирования, сборки и эксплуатации космических аппаратов студентами и школьниками. Проектирование макета наноспутника формата CubeSat позволит исследовать функционирование штатной аппаратуры и модуля полезной нагрузки и сложить представление о работе реальных спутников. В данной статье описан процесс разработки и изготовления лабораторного макета спутника формата CubeSat, оснащенного аппаратурой для захвата фото- и видеоизображений.

Постановка задачи и подход к ее решению

Одной из ключевых задач наноспутника является захват изображений и видео. Чтобы успешно выполнить эту задачу, необходимо разработать и настроить соответствующее оборудование, включающее в себя бортовой компьютер и видеокамеру. Кроме того, требуется спроектировать и изготовить корпус лабораторного макета спутника. В этот корпус будут встроены все аппаратные компоненты, что позволит создать полноценный макет наноспутника.

В качестве потенциального бортового компьютера проектируемого лабораторного макета спутника формата CubeSat была выбрана программно-аппаратная платформа Raspberry Pi Zero W. Это миниатюрный одноплатный компьютер, работающий на Linux (рис. 1). На плате размером 66×32 мм поместились чип Broadcom BCM2835 и чип оперативной памяти объемом 512 МБ, порты ввода-вывода, слот для microSD-карты и мультимедийные интерфейсы [3].

Чип Broadcom BCM2835 выполнен по технологии SoC (англ. System-on-Chip – система на кристалле). Он включает в себя процессор CPU ARM1176JZ-F с частотой 1 ГГц и двухъядерный графический процессор GPU VideoCore IV с частотой 400 МГц. Главное отличие Zero W от стандартной Raspberry Pi Zero – наличие беспроводного модуля с Wi-Fi и Bluetooth, что позволяет интегрировать мини-компьютер в проекты интернета вещей (IoT) без дополнительной периферии. Мощности про-

цессора хватает для работы с графическими операционными системами, воспроизведения фильмов, ретро-эмуляции и обработки потокового видео с помощью библиотеки OpenCV.

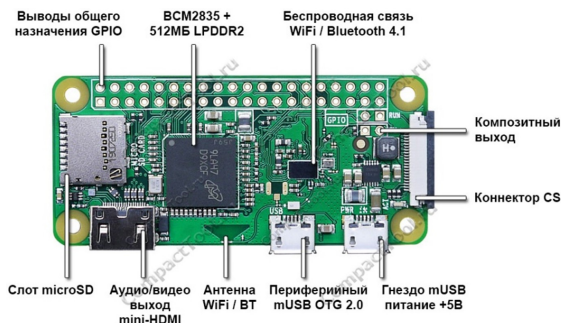


Рис. 1. Внешний вид Raspberry Pi Zero W

Для загрузки системы используется карта памяти microSD с ОС Raspbian (рис. 2) [4]. При подключении питания система за несколько секунд загрузится с графической оболочкой Raspbian, очень похожей на привычную Windows. Можно поочередно использовать несколько флеш-карт с разными образами систем.

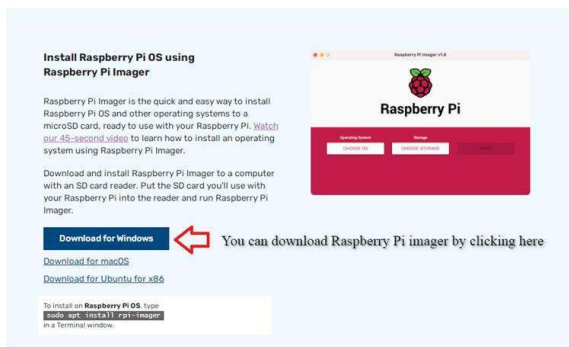


Рис. 2. Установка операционной системы Raspberry Pi OS (32 bit)

Raspberry Pi Zero W – это компактный и доступный компьютер, который открывает широкие возможности для создания разнообразных проектов. Благодаря мощному процессору, встроенным модулям Wi-Fi и Bluetooth, а также богатому выбору разъемов, Zero W отлично подходит для реализации лабораторного макета спутника формата CubeSat.

Следующим шагом при организации испытательного макета является подключение компьютерной периферии (рис. 3). После этого получим базовую операционную систему, созданную из стандартного образа ОС с интегрированной графической оболочкой при первом запуске на Raspberry.

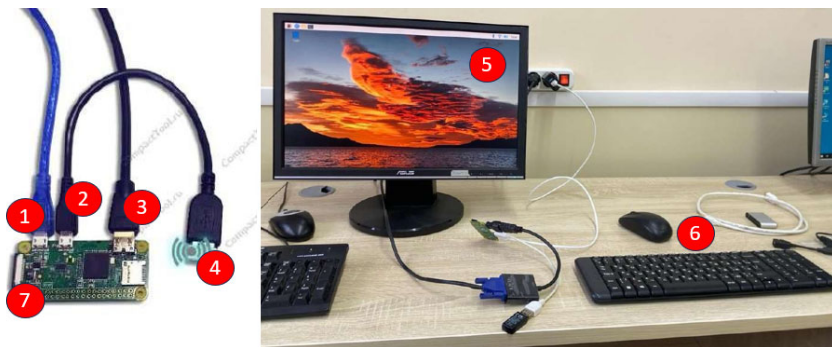


Рис. 3. Схема подключения испытательного макета: 1 – источник питания (micro USB на 3A); 2 – переходник OTG (micro USB-USB); 3 – переходник mini-HDMI, переходник HDMI на VGA, кабель VGA-VGA; 4 – ресивер от беспроводного комплекта клавиатура/мышь; 5 – монитор; 6 – клавиатура, мышь; 7 – Raspberry Pi Zero W

В проекте используется камера, разработанная специально для микрокомпьютеров Raspberry Pi (рис. 4). Она подключается в разъем CSI на плате с помощью короткого плоского кабеля (FFC-шлейфа). Сама камера имеет размеры $25 \times 20 \times 9$ мм и весит всего 3 грамма, что делает ее идеальной для мобильных проектов, где вес и размер имеют огромное значение.



Рис. 4. Raspberry Pi Camera Rev. 1.3

Создадим программный код на языке Python [5], который позволит сделать захват изображения с камеры Raspberry Pi Camera Rev 1.3 и сохранить полученное изображение в формате JPEG на рабочий стол (рис. 5).

Листинг 1. Программный код для получения снимка с камеры

```
import picamera
import time

# Путь для сохранения изображения
image_path = '/home/btsevm/Desktop/image.jpg'

# Инициализация камеры
with picamera.PiCamera() as camera:
# Настройка разрешения и частоты кадров
    camera.resolution = (1024, 768)
    camera.framerate = 25

# Создание снимка
    camera.capture(image_path)
time.sleep(2)
```

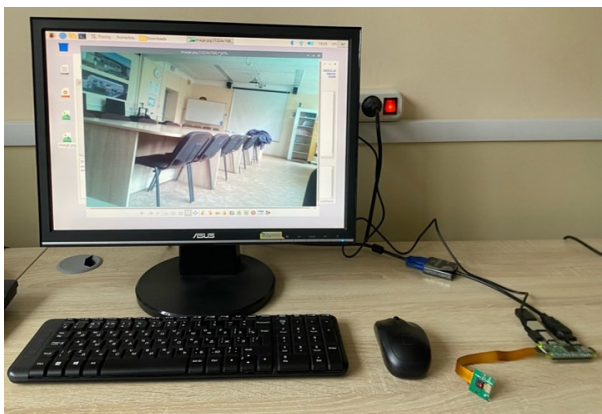


Рис. 5. Работа Raspberry Pi Zero W в режиме захвата фото

Таким образом, программный код является верным и теперь его можно использовать для захвата изображения с камеры. Доработаем программный код для захвата видео. Теперь с помощью камеры запишем 10-секундное видео (рис. 6) и сохраним файл в формате H.264 на рабочий стол.

Для разрабатываемого макета спутника спроектируем корпус в программе КОМПАС-3D (рис. 7). Конструкция должна соответствовать спецификации CubeSat REV 13. Корпус позволяет использовать модульную конструкцию спутника и устанавливать все устройства штатной аппаратуры.

Листинг 2. Программный код для захвата видео

```
from picamera import PiCamera
from time import sleep

# Инициализация камеры
camera = PiCamera()

# Путь для сохранения видео
camera.start_recording('/home/btsevm/
Desktop/video.h264')

# Запись в течение 10 секунд
camera.wait_recording (10)
camera.stop_recording()

# Закрытие камеры
camera.close()
```

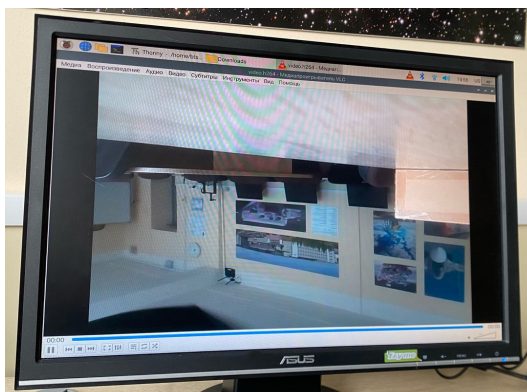
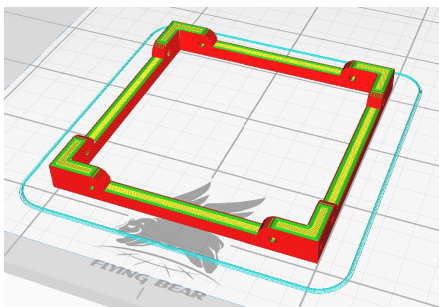


Рис. 6. Воспроизведение видео на Raspberry Pi Zero W

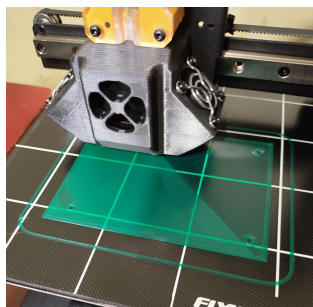
Далее перейдем к созданию элементов корпуса с использованием технологии трехмерной печати [6]. Этот процесс включает в себя подготовку деталей к 3D-печати в программе-слайсере UltiMaker Cura (рис. 8, а) и последующую печать на 3D-принтере (рис. 8, б).



Рис. 7. Разработка корпуса в программе КОМПАС-3D



a



б

Рис. 8. Изготовление деталей корпуса методом 3D-печати: подготовка деталей к 3D-печати в программе-слайсере UltiMaker Cura (*a*); печать деталей на 3D-принтере (*б*)

Теперь приступаем к сборке корпуса макета наноспутника. Для этого в деталях продельваем все необходимые крепежные отверстия, а затем с помощью метчика нарезаем резьбу, которая обеспечит свободное вкручивание винтов (рис. 9, *a*). Далее соединяем детали между собой,

используя винты М2,5 и М3. После этого в получившийся корпус устанавливаем солнечные панели, камеру и бортовой компьютер (рис. 9, б).

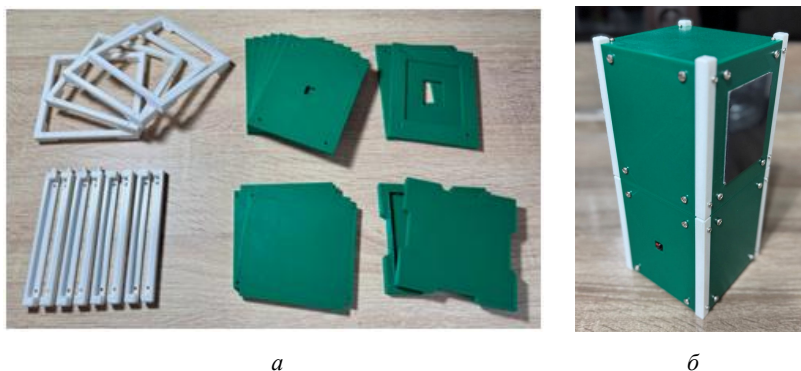


Рис. 9. Сборка корпуса: подготовка деталей к сборке (а);
сборка и установка компонентов в корпус (б)

В результате мы получаем макет спутника, оснащенный аппаратурой для съемки фото и видео.

Теперь перейдем к испытаниям получившегося лабораторного макета. В качестве примера сделаем снимок учебной аудитории и отобразим полученное изображение на мониторе (рис. 10).

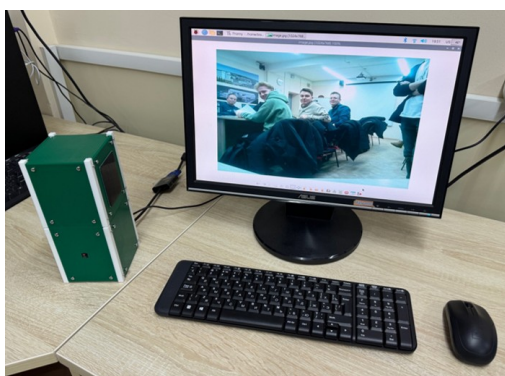


Рис. 10. Получение фотоизображения при помощи макета спутника.

Стоит отметить, что качество получаемых изображений достаточно высокое, что позволяет рассмотреть все детали на фотографии. Однако скорость съемки не самая быстрая, поэтому приходится некоторое вре-

мя держать объект съемки неподвижно, чтобы избежать смазывания изображения. Видеозаписи также создаются без каких-либо трудностей, а их качество идеально подходит для демонстрации в рамках лабораторного макета.

Выводы

В процессе работы было разработано и настроено оборудование для захвата фото и видео, спроектирован и собран корпус лабораторного макета спутника, а также проведены испытания по фиксации фото- и видеоизображений с наноспутника и их воспроизведению на экране монитора.

В дальнейшем планируется оснастить лабораторный макет системой электропитания (СЭП), приемо-передающим устройством (ППУ) для дистанционной передачи фото и видео, а также разработать пользовательский интерфейс для управления компонентами спутника.

При условии проведения вышеописанных доработок лабораторный макет спутника формата CubeSat может быть использован для проведения лабораторных и практических занятий, направленных на получение школьниками и студентами умений и навыков конструирования, программирования, работы с электронными компонентами, проектно-исследовательской деятельности.

Список использованных источников и литературы

1. Монк, С. Raspberry Pi Cookbook. – Москва : Дialeктика, 2019. – 528 с.
2. Конструкторы и наборы Introsat. – URL: <https://introsat.ru/ru/space-education-kits-all> (дата обращения: 12.11.2024).
3. Петин, В. Arduino и Raspberry Pi в проектах Internet of Things. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2019. – 432 с.
4. Raspberry Pi OS. – URL: <https://www.raspberrypi.com/software/> (дата обращения: 12.11.2024).
5. Введение. Основы Python. – URL: <https://education.yandex.ru/handbook/python/article/intro> (дата обращения: 12.11.2024).
6. ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы: введ. впервые : дата введения 2017-07-27. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

K. R. Abashev, master student

S. N. Belyaeva, master student

V. A. Glushkov , CSc in engineering, associate professor

E-mail: kra_dept@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Obtaining Photo and Video Images from the Payload of the CubeSat Satellite Laboratory Prototype

Miniaturization of spacecraft and reduced launch costs open up new opportunities for conducting scientific research and monitoring the Earth using CubeSat satellites. However, the limited resources of a nanosatellite, such as power consumption, memory capacity, and computing power, place special requirements on image acquisition and processing systems. This article discusses methods for obtaining and processing photo and video images from the payload of a laboratory model of a CubeSat satellite. Special attention is paid to the direct implementation of the laboratory layout. The results of the study are of practical interest to schoolchildren and students of specialized universities and can contribute to improving the level of knowledge in the field of spacecraft design.

Keywords: CubeSat satellite, laboratory satellite prototype, photo and video image acquisition, Raspberry Pi Zero W, Raspberry Pi Camera Rev 1.3, Python, CubeSat satellite body design.

УДК 621.3.031.8

*Д. И. Владыкин*¹, студент

Консультант: *И. Р. Владыкин*², д-р техн. наук, проф.

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Удмуртский государственный аграрный университет, Ижевск, Россия

Эффективность систем автоматического управления для солнечных элементов с дифференциальным расположением

Цель исследования заключается в изучении эффективности солнечных элементов с дифференциальным расположением по сравнению со стационарными. Для интенсивного развития цивилизации нужно производить энергию для хозяйственной деятельности, в настоящее время актуальным становится необходимость в получении чистой энергии. При изучении эффективности была разработана и собрана исследовательская установка. В результате мы выяснили, что применение данной системы весьма эффективно во время восхода и захода солнца.

Ключевые слова: солнечный элемент, дифференциальное расположение, микроконтроллер, система управления.

Введение

Залог успешного развития цивилизации — производство энергии для хозяйственной деятельности. В наше время особенно остро стоит вопрос о получении чистой энергии. Один из примеров – использование солнечных элементов для работы маломощных приборов. Исследования в области производства чистой энергии показывают, что в регионах, которые находятся в световой зоне с естественным солнечным излучением более 1700 часов в год, выгодно устанавливать солнечные батареи под оптимальным углом к солнцу. Среди множества работ, направленных на создание технических устройств для оптимального расположения солнечных панелей, выделяются исследования по применению и управлению шаговыми двигателями. Хотя принцип работы шаговых двигателей практически не менялся на протяжении всей истории, развитие систем управления ими продолжается, таким образом, реализация системы управления на базе цифровой промышленной электроники с использованием программного обеспечения позволяет эффективно

управлять шаговым двигателем. Целью исследования является изучение эффективности солнечных элементов с дифференциальным расположением по сравнению со стационарными.

Сведения из теории

Теоретическая основа целесообразности поиска эффективного расположения солнечных панелей в зависимости от угла солнцестояния объясняется естественными процессами в природе, которые мы можем наблюдать. Например, в течение дня растения располагаются перпендикулярно углу солнцестояния для получения большей дозы фотосинтетической радиации. В трудах ученых [1, 2] доказано положительное влияние облучения в агротехнологических процессах. Касательно расчетов координат солнца сегодня не так уж и сложно вычислить положение планеты или звезды по ее орбитальным элементам. Единственное, что нам понадобится, это компьютер и подходящая программа [3].

Описание эксперимента

Чтобы изучить эффективность солнечных элементов с дифференциальным положением по сравнению со стационарными, проведем наблюдение за объектами исследования и фиксацию изменения выработанной ЭДС. Для этого спроектируем и соберём экспериментальную установку, которая будет рассчитывать координаты солнца относительно наблюдателя и поворачивать солнечный элемент. В свою очередь, алгоритмы для определения расположения солнца на небосклоне давно написаны, их можно найти в свободном доступе [3], но они не учитывают управление электропривода шаговым двигателем и платформу, на которой будут производиться вычисления. Поэтому уже существующий программный код был дополнен элементами управления и перенесен на микроконтроллер Atmega16. Условия эксперимента:

- Измерения микро ЭДС солнечного элемента типа SL55X55-150 проводились нами в естественной природе, в координатах $56^{\circ}51'11''$ северной широты и $53^{\circ}12'44''$ восточной долготы.

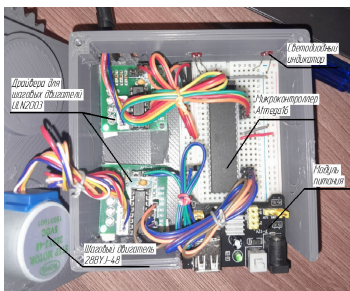
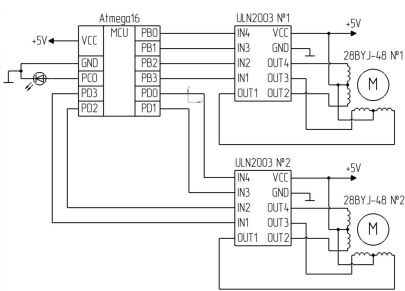
- В качестве базового варианта было выбрано стационарное расположение солнечного элемента, а за исследуемый вариант – дифференциальное. Обе солнечные панели работали одновременно.

- Исследование проводилось в ясные солнечные дни 15.09.2024 с 14:30 до 18:00 и 16.09.2024 с 6:30 до 14:30 часов (по МСК).

- Показания микроЭДС были получены с помощью контроллера Arduino Uno, выполненного на базе процессора Atmega328p с чипом связи Mega 16U2.

- Данные эксперимента были занесены с контроллера на ноутбук с помощью USB-порта.

Была сконструирована и собрана система управления (рис. 1, *а*) для дифференциального расположения солнечных элементов, где в роли управляющего элемента взят микроконтроллер Atmega16 от фирмы Microchip Technology, а связь между ним и электроприводами реализована с помощью драйверов для шаговых двигателей ULN2003.

 α 

6

Рис. 1. Фотография готового устройства системы управления (а); электрическая схема внутренних соединений в системе управления (б)

Результаты

После того как мы получили работоспособную систему управления для дифференциального расположения солнечных элементов, стало возможным проведение эксперимента в естественной природе (рис. 2). В результате экспериментов были получены следующие данные (рис. 3).

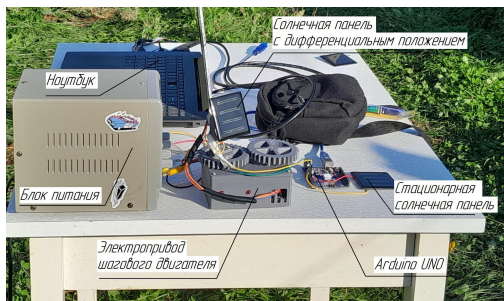


Рис. 2. Фотофакт проведения экспериментов

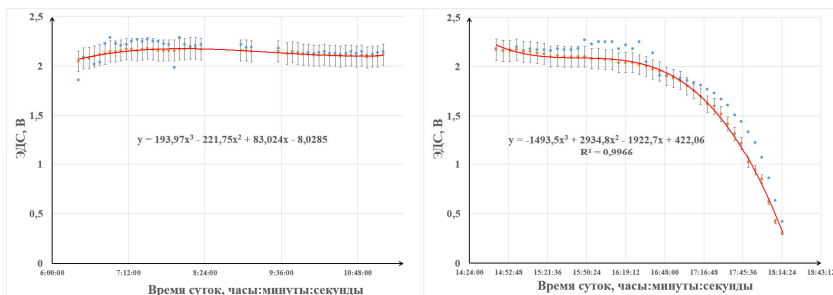


Рис. 3. Результат экспериментальных данных (красная линия – стационарный солнечный элемент; синие маркеры – дифференциальный солнечный элемент)

Анализ рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

– Утром с 6:00 до 14:30 ЭДС, генерируемая солнечными батареями, расположенными стационарно на горизонтальной поверхности по отношению к углу солнцестояния (красная линия), по сравнению с панелями, угол наклона которых адаптируется по отношению к положению солнца на небосводе (синие маркеры), находится в пределах стандартных погрешностей $\pm 5\%$. Следовательно, в этот временной отрезок применение устройства с изменяющимся углом расположения солнечных панелей считаем нецелесообразным.

– Во временной отрезок с 15:30 до захода солнца ЭДС, полученное от солнечных панелей, угол которых регулируется системой автоматического управления электропривода шаговым двигателем, превышает ЭДС от солнечных панелей, расположенных стационарно на горизонтальной поверхности в среднем на $9,2\%$.

Выводы

Результаты экспериментов позволяют сделать заключение, что применение системы автоматического управления электропривода расположения солнечных элементов шаговым двигателем весьма эффективно во время восхода и захода солнца, что не скажешь про оставшуюся часть солнечного дня. Так как в нашей установке шаговые двигатели срабатывают раз в пять минут и в оставшееся время бездействуют, а микроконтроллер в роли управляющего элемента потребляет малое количество электроэнергии, можно сказать, что затраты на систему автоматического управления для солнечных элементов с дифференциальным расположением будут незначительные, тем более учитывая, что площадь солнечных панелей можно увеличить.

Список использованных источников и литературы

1. *Ovchukova, S. A.* Energy saving in lighting technologies of agricultural production / N. P. Kondratieva, O. Y. Kovalenko // *Light & Engineering*. – 2021. – Vol. 29, no. 2. – Pp. 21-25.
2. *Владыкин, И. Р.* Обоснование комплексного применения электротехнологий для повышения продуктивности огурца в сооружениях защищенного грунта : дис. ... д-ра техн. наук. – Москва : ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2019. – 185 с.
3. *Пол Шлитер.* Вычисление положений планет – руководство с практическими примерами. – URL: <https://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html#5> (дата обращения: 22.07.2024).

*D. I. Vladykin*¹, bachelor student

Advisor: *I. R. Vladykin*², DSc in engineering, prof.

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

Efficiency of Automatic Control Systems for Solar Cells with Differential Arrangement

The research purpose is to study the efficiency of solar cells with a differential arrangement compared with stationary ones. For the intensive development of civilization, it is necessary to produce energy for economic activity; currently, the need to obtain clean energy is becoming urgent. While studying the effectiveness, a research facility was developed and assembled. As a result, we found out that the use of this system is very effective during sunrise and sunset.

Keywords: solar cell, differential arrangement, microcontroller, control system.

УДК 537.86:621.373(06)

Д. А. Воронин , магистрант

И. В. Князев, аспирант

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.

E-mail: kikvoronune@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Экспериментальная проверка хаотической системы на основе цепи Чуа дробного порядка

Разработан и испытан макет хаотической системы на основе цепи Чуа дробного порядка. Основой разработки макета послужила математическая модель цепи Чуа дробного порядка, корректность которой подтверждена моделированием в Matlab. Результаты экспериментальной проверки макета показали, что хаотические режимы экспериментальной цепи Чуа дробного порядка достаточно хорошо отражают поведение математической модели.

Ключевые слова: фрактальный импеданс, двухполосники с фрактальным импедансом, цепь Чуа дробного порядка, фазовый портрет.

Введение

Динамический хаос представляет большой интерес и обладает большими потенциальными возможностями в сфере прикладных исследований и разработок прежде всего в радиофизике, электронике, системах передачи и защиты информации [1]. Для реализации этих возможностей необходимо иметь эффективные источники хаотических сигналов в различных участках электромагнитного спектра. Одним из наиболее простых и изученных источников хаотических колебаний (генераторов хаоса – ГХ) является хаотическая система на основе цепи Чуа на элементах с сосредоточенными параметрами [2]. В работах [3, 4] повышение криптостойкости систем защиты информации связывают с использованием нового класса ГХ – ГХ дробного порядка. В работе [5] предложена математическая модель хаотической системы на основе цепи Чуа дробного порядка (ЦЧДП), в которой емкостные элементы в LC -контуре и фильтры нижних частот (ФНЧ) заменены элементами с фрактальным импедансом.

Целью данной работы является создание прототипа ЦЧДП с использованием стандартных радиоэлементов и экспериментальная проверка

соответствия параметров прототипа параметрам этой хаотической системы, полученным моделированием в среде Matlab.

Моделирование цепи Чуа дробного порядка в среде Matlab

В математической модели ЦЧДП элементы с фрактальным импедансом представляются выражениями для фрактального импеданса вида $Z_F = (1/\omega^\delta C_F)e^{-j0,5\delta\pi}$, где δ – дробный порядок фрактального импеданса ($0 < \delta < 1$). Учитывая, что в физическом прототипе ЦЧДП возможно только ограниченное число сочетаний дробных порядков элементов с фрактальным импедансом (δ_1, δ_2), для моделирования были заданы следующие значения: в LC -контуре вместо емкостного элемента используется импеданс $Z_{F_2} = (1/\omega^{\delta_2} C_F)e^{-j0,5\delta_2\pi}$ со значением $\delta_2 = 0,93$; в ФНЧ – импеданс $Z_{F_1} = (1/\omega^{\delta_1} C_F)e^{-j0,5\delta_1\pi}$, значения дробного показателя δ_1 задавались равными 0,88; 0,91; 0,98. Фазовые портреты при этих значениях дробных показателей изображены на рис. 1.

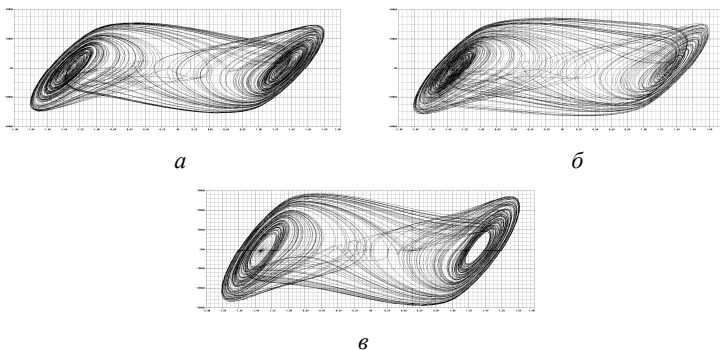


Рис. 1. Фазовые портреты ЦЧДП, полученные в Matlab:
а – при $\delta_1 = 0,91$ и $\delta_2 = 0,93$; б – при $\delta_1 = 0,88$ и $\delta_2 = 0,93$; в – при $\delta_1 = 0,98$ и $\delta_2 = 0,93$

Экспериментальная проверка работы модели ЦЧДП

На рис. 2, а изображена схема цепи Чуа дробного порядка, используемая при выводе математической модели в работе [5]. Здесь блоки Zf1 и Zf2 представляют собой элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ), выполненные в виде многозвенных RC -цепей, синтезированных по заданным значениям δ_1 и δ_2 методом Кауэра [6]. Прототип хаотической системы дробного порядка собран из стандартных резисторов и конденсаторов и изображен на фото (рис. 2, в). В макете используется четыре RC -цепи с одинаковой структурой (рис. 2, б), моделирующих ЭФИ. Zf2 синтезирован со значением дробного порядка $\delta = 0,93$, а Zf1 является

сменным, реализующим ЭФИ с δ равными 0,98; 0,91; 0,88, соответствующие значениям, использованным при моделировании в Matlab.

Фазовые портреты, полученные при работе экспериментального макета ЦЧДП, изображены на рис. 3.

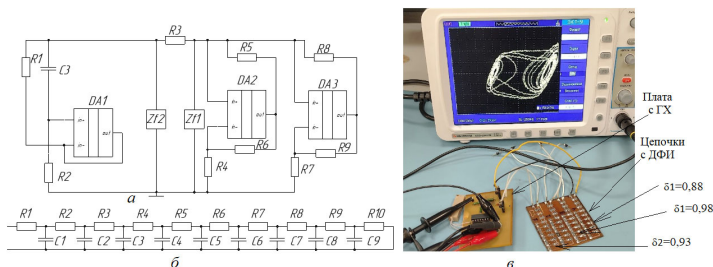


Рис. 2. Макет экспериментального ЦЧДП: схема (а); схема замещения ЭФИ (б); фото экспериментальной установки (в)

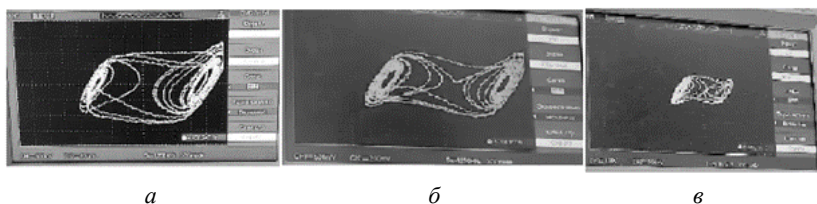


Рис. 3. Фазовые портреты экспериментального ЦЧДП: $\delta_1 = 0,91, \delta_2 = 0,93$ (а); $\delta_1 = 0,88, \delta_2 = 0,93$ (б); $\delta_1 = 0,98, \delta_2 = 0,93$ (в)

Сравнивая фазовые портреты на рис. 1 и рис. 3, можно сделать следующие выводы.

При одинаковых дробных порядках фрактальных импедансов математической модели и имитирующих их элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ) макета наблюдаются хаотические режимы с хорошо совпадающими формами аттракторов.

Некоторое отличие аттракторов, полученных в эксперименте, от аттракторов, полученных в Matlab, можно объяснить тем, что при моделировании в Matlab использовались точные выражения фрактальных импедансов, а в макете в ЭФИ были использованы стандартные компоненты ряда E24, номиналы которых имеют разброс в пределах поля допуска.

Выводы

Моделирование в эксперименте отражало работу фактически реальной ЦЧДП. Тот факт, что даже в этих условиях хаотические режимы

экспериментального ЦЧДП достаточно хорошо отражают поведение математической модели, предложенной в [5], говорит о практической возможности проектирования и создания ГХ на основе ЦЧДП.

Список использованных источников и литературы

1. *Агуреев, К. И.* Применение детерминированного хаоса для передачи информации // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. – Ч. 2. – С. 197–211.
2. A Universal Circuit for Studying and Generating Chaos – Part I: Routes to Chaos / L. O. Chua et al. // IEEE Transaction on Circuit and Systems. – Vol. 40, no. 10. – October 1993. – Pp.732-744.
3. *Petráš, I.* A note on the fractional-order Chua's system. Chaos // Solitons & Fractals. – 2008. – Vol. 38. – Pp. 140-147. – DOI: 10.1016/j.chaos.2006.10.054.
4. *Petrzela, J.* Chaos in Analog Electronic Circuits: Comprehensive Review, Solved Problems, Open Topics and Small Example // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 1-28. – DOI: 10.3390/math10214108.
5. *Князев, И. В.* К выводу математической модели хаотической системы на примере цепи Чуа дробного порядка / И. В. Князев, П. А. Ушаков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 102-112. – DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-102-112.
6. *Ушаков П. А., Князев И. В.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ K11 2024616679, 22.03.2024. – Заявка от 20.03.2024.

D. A. Voronin ✉, master student

I. V. Knyazev, postgraduate

P. A. Ushakov, DSc in engineering, prof.

E-mail: kikvoronune@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Experimental Verification of a Chaotic System Based on the Chua Circuit of Fractional Order

A mock-up of a chaotic system based on a fractional-order Chua circuit has been developed and tested. The mathematical model of the fractional-order Chua circuit served as the basis for the development of the setup, the correctness of which was confirmed by modeling in Matlab. The results of the experimental verification of the setup showed that the chaotic modes of the experimental fractional-order Chua circuit fairly well reflect the behavior of the mathematical model.

Keywords: fractal impedance, single-terminal pair with fractal impedance, fractional-order Chua circuit, phase portrait

УДК 004.4.234

А. И. Гатценбиллер, студент
О. Я. Шамсиахметов, ст. преподаватель
E-mail: kra_dept@istu.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Особенности адаптации программных кодов скриптовых сценариев в современных браузерах

В статье рассматривается возможность самостоятельного переписывания программ с языка VBScript на JavaScript. Особое внимание уделяется причинам, по которым приходится переходить с VBScript на JavaScript. Подчеркивается, что компания Microsoft прекратила поддержку VBScript, что делает его использование в современных веб-приложениях невозможным.

Авторы сравнивают типы данных, используемых в этих языках, и их синтаксис, чтобы выделить основные различия и сходства. Приводят примеры кода на VBScript и их адаптации на JavaScript, что позволяет наглядно продемонстрировать процесс перехода.

Завершается статья анализом сложности перехода с VBScript на JavaScript, это дает оценить свои силы, требуемые для успешной миграции кода. Это делает материал полезным для разработчиков, планирующих переход на более современные технологии и стремящихся к улучшению качества своих веб-приложений.

Ключевые слова: языки программирования VBScript и JavaScript, конвертирование кода, синтаксис VBScript и JavaScript, веб-разработка.

Введение

Конвертирование программ с одного языка программирования на другой является важной задачей в современном мире разработки программного обеспечения. VBScript использовался в веб-разработке. Однако с развитием веб-технологий и завершением корпорацией Microsoft поддержки языка VBScript в Internet Explorer возникает необходимость переноса функционала на более современные и гибкие платформы.

Решение задачи

Прежде чем начать конвертирование кода, важно тщательно изучить код на исходном языке, понять, как работает каждая часть программы, какие функции она выполняет и какие данные использует.

Также нужно определить, какие функции и задачи должна выполнять программа после переписывания на новый язык. Это поможет сохранить функциональность программы и избежать ошибок.

Перед началом переписывания кода необходимо убедиться в хорошем понимании особенностей нового языка программирования. Это позволит сделать код более эффективным.

Одним из основных различий между JavaScript и VBScript является их синтаксис. JavaScript следует синтаксису в стиле C, который включает использование фигурных скобок {} и точки с запятой (;) для разделения операторов.

Для облегчения конвертирования кода с VBScript на JavaScript была составлена таблица, в которой сравниваются функции.

После анализа синтаксических отличий между VBScript и JavaScript, представленного в таблице, можно с уверенностью сказать, что перевод кода с одного языка на другой не является очень сложной задачей.

В ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова на кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» была создана демонстрационная модель контроля информационного потока методом Хэмминга, работающая в браузере Internet Explorer с использованием скриптовых сценариев VBS.

Код Хемминга – это блочный код, позволяющий исправлять одиночные и фиксировать двойные ошибки, разработанный Ричардом Хеммингом.

Но так как корпорация Microsoft прекратила поддержку языка VBS, то возникла проблема при проведении лабораторных работ.

Для запуска модели требуется использовать виртуальную машину с установленным браузером Internet Explorer нужной версии, и у многих возникают проблемы с выполнением лабораторной работы.

В связи с этим было принято решение переписать код на язык JavaScript, который поддерживают большинство современных браузеров.

Для лучшего понимания разницы языков программирования рассмотрим пример оригинального кода сайта, написанного на VBScript в рамках лабораторной работы.

Примеры исходного и получившегося кода показаны ниже, что наглядно демонстрирует основные изменения и адаптацию к особенностям JavaScript.

Сравнение функций

№	Функции	VBScript	JavaScript
	Вывод сообщения	MsgBox "Hello World"	alert("Hello World");
2	Объявление переменной	Dim x	let x;
3	Объявление массива	Dim arr(n)	let arr = new Array(n); или let arr = [n];
4	Присваивание значения	x = 5	x = 5;
5	Оператор if	If x = 5 Then MsgBox "x is 5"	if (x == 5) {alert("x is 5"); }
6	Цикл For	For i = 1 To 10 MsgBox i Next	for (let i = 1; i <= 10; i++) { alert(i); }
7	Функция	Function Add(a, b) \n Add = a + b \n End Function	function add(a, b) { return a + b; }
8	Генерация случайных чисел	Randomize min = 1 max = 100 randomNumber = Int((max - min + 1) * Rnd + min)	function getRandomInt(min, max) { return Math.floor(Math.random() * (max - min + 1)) + min;} let randomNumber = getRandomInt(1, 100);
9	Вывод информации	document.all.Edit1.value	document.getElementById("Edit1").value

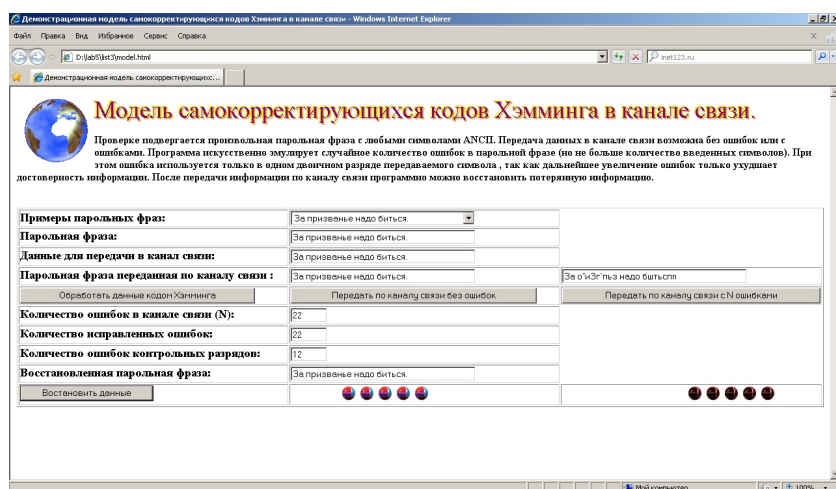


Рис. 1. Модель самокорректирующихся кодов Хэмминга в канале связи

Листинг 1. Исходный код на VBScript:

```
sub Button2_OnClick() 'чтение парольной фразы полученной из канала
связи
    ReDim symbol(n) 'определяем кодированный массив
    for i=1 to n 'последовательное чтение символов контрольной фразы
        a=m 'счетчик информационных разрядов
        symbol(i)=0
        for j=1 to nkod 'читаем информационные биты
            kontrol=0 'метка отсутствия контрольного разряда
            for b=0 To k-1 'кроме контрольных разрядов
                kreal=2^b
                if j=kreal then
                    kontrol=1 'метка наличия контрольного разряда
                end if
            next
            if kontrol=0 then 'расчет десятичного кода символа
                symbol(i)=symbol(i)+kodmassiv(i,j)*2^(a-1)
                a=a-1
            end if
        next
    next
    document.all.Edit6.value="" 'вывод информации о парольной фразе
    в браузер
    for i=1 to n
        document.all.Edit6.value=document.all.Edit6.value+Chr(symbol(i))
    next
end sub
```

Приведенный пример кода на VBScript отвечает за работу кнопки “Передать по каналу связи без ошибок”. При нажатии на эту кнопку происходит обработка двоичного массива и перевод чисел из двоичной системы счисления в десятичную, после чего полученные значения преобразуются в соответствующие значениям символы и выводятся в нужную строку.

Листинг 2. Переписанный код на JavaScript:

```
document.getElementById("Button2").addEventListener("click",
function() //чтение парольной фразы полученной из канала связи
{
    symbol.length = n; //определяем кодированный массив
    for (i = 0; i < n; i++) //последовательное чтение символов
        контрольной фразы
    {
        a = m; //счетчик информационных разрядов
        symbol[i] = 0;
        for (j = 0; j < nkod; j++) //читаем информационные биты
        {
            kontrol = 0; //метка отсутствия контрольного разряда
            for (b = 0; b < k; b++) //читаем информационные биты
            {
                kreal = 2 ** b;
                if (j == kreal)
                {
                    kontrol = 1; //метка наличия контрольного разряда
                }
            }
            if (kontrol == 0) //расчет десятичного кода символа
            {
                symbol[i] = symbol[i] + kodmassiv[i][j] * 2 ** (a - 1);
                a = a - 1;
            }
        }
    }
    document.getElementById("Edit6").value = ""; //вывод информации
    о парольной фразе в браузер
    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        document.getElementById("Edit6").value = docu-
ment.getElementById("Edit6").value + String.fromCharCode(symbol[i]);
    }
});
```

На конвертацию этой функции ушло не больше 15 минут, так как функция была небольшого объема и не имела сложных конструкций.

Поставленная задача по конвертации кода была выполнена. Конвертированный код успешно выполняет все свои функции. Также был немного изменен дизайн самого сайта.

Студенты снова смогут без каких-либо проблем выполнять лабораторную работу и изучать работу метода Хэмминга.



Модель самокорректирующихся кодов Хэмминга в канале связи.

Проверке подвергается произвольная контрольная фраза с любыми символами ASCII. Передача данных в канале связи возможна без ошибок или с ошибками. Программа искусственно эмулирует случайное количество ошибок в контрольной фразе (но не больше количества введенных символов). При этом ошибка используется только в одном двоичном разряде передаваемого символа, так как дальнейшее увеличение ошибок только ухудшит достоверность информации. После передачи информации по каналу связи программно можно восстановить потерянную информацию.

Расчет контрольной фразы методом Хэмминга закончен

1.Выбрать контрольную фразу:	За призвание надо биться	
Контрольная фраза выбрана:	За призвание надо биться.	
Контрольная фраза обработана кодом Хэмминга:	За призвание надо биться.	2.Обработать контрольную фразу кодом Хэмминга
Контрольная фраза в канале связи:	За призвание надо биться.	ра пфизванеЕ нббб бЩры:лл
Количество ошибок информационных разрядов:	0	3. Передать по каналу связи без ошибок
Количество ошибок контрольных разрядов:	1	4. Передать по каналу связи с ошибками
Общее количество ошибок в канале связи:	9	
Количество исправленных ошибок:	9	
Восстановленная парольная фраза:	За призвание надо биться.	5. Восстановить данные

Рис. 2. Модель самокорректирующихся кодов Хэмминга в канале связи, написанная на языке JavaScript

Выводы

Программа, переписанная на JavaScript, работает без потери качества и скорости работы.

Переписывание программ с VBScript на JavaScript не вызовет трудностей у людей, знакомых с программированием. При конвертировании важно учитывать различия в синтаксисе языков и доступных библиотеках.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку автоматизированных инструментов для упрощения процесса конвертирования кода.

Список использованных источников и литературы

1. Шамсияхметов, О. Я. Методическое руководство к лабораторной работе № 2 по курсу «Информационные технологии» «Использование скриптовых сценариев VBS при разработке демонстрационной модели контроля информационного потока методом Хэмминга в браузере Internet Explorer». – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. – 116 с. – URL: https://studopedia.ru/19_5752_yazik-tekstovoy-razmetki-HTML.html (дата обращения: 25.11.2024).

2. Браун, Э. Изучаем JavaScript : руководство по созданию современных веб-сайтов. – 3-е изд. – Санкт-Петербург : Диалектика, 2017. – 368 с. – URL: <https://djvu.online/file/N7odATzj27FsE> (дата обращения: 25.11.2024).

3. Уилсон, Д. Microsoft VBScript Step by Step. – Редмонд : Microsoft Press, 2007. – 511 с. – URL: http://xgangand.free.fr/adm/files/books/scripting/microsoft_vbscript_step_by_step.pdf (дата обращения: 25.11.2024).

A. I. Gattsenbiller, student

O. Ya. Shamsiakhmetov, senior teacher

E-mail: kra_dept@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Features of Adaptation of Program Codes of Script Scenarios in Modern Browsers

This article discusses the possibility of independently rewriting programs from VBScript to JavaScript. The article focuses on the reasons why you have to switch from VBScript to JavaScript. In particular, it is emphasized that Microsoft has discontinued support for VBScript, which makes its use in modern web applications impossible.

The authors compare the data types used in these languages and their syntax to highlight the main differences and similarities. They provide examples of VBScript code and their adaptation to JavaScript, which allows you to visually demonstrate the transition process.

The article concludes with an analysis of the complexity of the transition from VBScript to JavaScript, which makes it possible to assess the forces required for successful code migration. This makes the material useful for developers planning to switch to more modern technologies and striving to improve the quality of their web applications.

Keywords: VBScript and JavaScript programming languages, code conversion, VBScript and JavaScript syntax, web development.

УДК 377.8

В. В. Чумаков, аспирант
E-mail: chvladis@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Методические аспекты моделирования и проектирования космических миссий в рамках реализации рабочей программы дисциплины «Радиотехника и электроника в космосе»

В статье рассматриваются возможные подходы к реализации программы рабочей дисциплины «Радиотехника и электроника в космосе» в контексте потребности формирования и развития у студентов – будущих педагогов – естественно-научных компетенций, связанных с основами астрономии, космонавтики, космического приборостроения. Отдельное внимание уделяется роли проектной деятельности и наставничества в достижении образовательных целей.

Ключевые слова: естественно-научные компетенции, междисциплинарный подход, основы космонавтики, проектная деятельность, проектные компетенции, методы наставничества.

Введение

Рабочая программа дисциплины «Радиотехника и электроника в космосе: методический аспект» (далее – РПД) разработана автором статьи для апробации в рамках диссертационного исследования на тему «Развитие естественно-научных компетенций студентов – будущих педагогов и практикующих учителей».

Актуальность темы исследования обусловлена заметным снижением уровня физико-математических знаний выпускников школ, на что обращают внимание вузы и что в свою очередь приводит к заметному снижению уровня естественно-научных компетенций у студентов технических специальностей – будущих инженеров, а также у студентов – будущих школьных учителей и педагогов профессионального обучения в технических областях.

Вместе с тем растут потребности государства и общества в квалифицированных технических специалистах и в педагогах, обладающих высоким уровнем естественно-научных компетенций и способных решать

профессиональные и педагогические задачи проектного типа, что обуславливает необходимость последовательного формирования и развития компетенций, связанных с механизмами моделирования, прогнозирования, проектирования профессиональной и учебно-познавательной деятельности обучающихся, а также наставничеством в проектном обучении в условиях междисциплинарной интеграции.

Наиболее эффективно эти актуальные для государства задачи могут быть решены с использованием высокого потенциала образовательной среды вуза.

Планируемые подходы к реализации РПД

Многогранность науки о космосе, ее междисциплинарный и универсальный характер, широкие возможности при выборе подходов к проектной и наставнической деятельности, а также эмпирический опыт автора статьи послужили основаниями для выбора темы РПД в рамках проводимого исследования.

Анализ близких по тематике программ дисциплин дал представление о том, что они либо узкоспециализированы в соответствии с потребностями локальных предприятий космической отрасли, например «Космическое приборостроение» в Юго-Западном государственном университете, «Системы ориентации космических аппаратов» в Сибирском федеральном университете, либо имеют общую мировоззренческую направленность, например «Основы космонавтики» в Российском государственном педагогическом университете им. А. И. Герцена, и, таким образом, не отражают в полной мере последовательной зависимости получения компетенций в области космического приборостроения от уровня сформированности представлений учащихся по основам космонавтики и от уровня их знаний по астрономии, а также не опираются на проектные методы для повышения эффективности своих образовательных целей.

Основной образовательной целью рассматриваемой РПД является последовательное формирование у студентов компетенций в области основ астрономии, космонавтики, космического приборостроения и компетенции по организации проектной деятельности.

Структура РПД представлена тремя основными разделами, названия которых соответствует ключевым компетенциям, прописанным в образовательной цели. Выбор наименований и содержания тем лекций в первом разделе «Основы астрономии» обусловлен тем, что автором статьи в период с 2014 по 2022 год была организована учебная и методическая работа, направленная на формирование и развитие у учителей и старшеклассников компетенций по направлению «астрономия».

Для подготовки содержательной части второго («Основы космонавтики») и третьего («Основы космического приборостроения») разделов РПД было подготовлено учебно-методическое обеспечение, куда вошла дополнительная специализированная литература [1].

С целью повышения проектных компетенций по направлению «космонавтика и космическое приборостроение» в августе 2024 года автор статьи дополнительно принял участие в работе Летней космической школы Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), образовательная программа которой включает теоретические и практические занятия по секциям: «Баллистика и орбитальная механика», «Спутнико-строение и космическая связь», «Дистанционное зондирование», «Планетные исследования», «Ракетно-космическая техника».

Образовательный интенсив ИКИ РАН завершается имитационным моделированием (симуляцией) космической миссии. Мини-проект позволяет участникам на практике закрепить полученные в процессе обучения навыки и умения, необходимые для достижения всех научных целей моделируемой миссии. В процессе симуляции космической миссии учащиеся описывают ее цели и их научную значимость, выбирают физические величины, которые нужно измерить для каждой цели, подбирают приборы, которыми смогут провести измерения или получить косвенную оценку значений физических величин, расписывают все необходимые характеристики приборов.

Практика Летней космической школы ИКИ РАН подтверждает эффективность применения проектного метода для формирования у учащихся необходимых представлений и компетенций в сфере астрономии, космонавтики и космического приборостроения.

Вместе с тем в исследовании Т. А. Парфеновой [2] на основе эмпирических данных подтверждается возможность разработки эффективной модели проектной компетенции студентов – будущих педагогов – и описание системы способов ее формирования в образовательной среде вуза с привлечением учителей и учащихся из общеобразовательных организаций.

Помимо этого, в 2022 году автор статьи приобрел положительный опыт [3], подтверждающий эффективность использования методов наставничества в проектном обучении учителей для развития проектных компетенций учащихся.

Для достижения образовательных целей РПД могут быть использованы следующие подходы и методы:

- Выявление потребностей и особенностей группы учащихся для большей адаптации учебного материала.

– Проведение входного тестирования в форме астрокосмического диктанта.

– Структура РПД сформирована таким образом, чтобы обучающиеся могли последовательно и логично усваивать сначала компетенции по основам астрономии, космонавтики, а затем по основам космического приборостроения, закрепляя полученные знания в ходе промежуточного тестирования и в процессе выполнения практических заданий и упражнений.

– Содержание РПД должно предусматривать получение представлений: о методах астрономических и астрофизических исследований, научных проблемах и связанных с ними проектах, ракетодинамике и космодинамике, о конструкции и устройстве современных космических аппаратов и их радиотехнических и электронных бортовых систем, микроэлектронной элементной базе, условиях ее стабильности и эффективного функционирования в космосе.

– Использование смешанной формы обучения с доступом к учебным материалам РПД на платформе дистанционного обучения GetCourse помогает учащимся самостоятельно усваивать материал в удобном темпе.

– Проведение практических занятий по решению задач должно быть связано с планированием и реализацией космических миссий, выбором научных приборов с учетом целей и задач миссии.

– Задачи и упражнения дифференцированы по уровням сложности с учетом индивидуальных особенностей учащихся.

– Для освоения студентами навыков и умений РПД применяются методы наставничества в проектной деятельности.

– В завершение обучения учащиеся готовят для зачета презентацию мини-проекта космической миссии.

Автор статьи полагает, что применение проектного подхода и методов имитационного моделирования при описании космических миссий на завершающем этапе обучения студентов будет служить эффективно-му достижению образовательных целей РПД. При этом еще большей эффективности можно достичь, если:

– закрепление знаний студентов в области астрономии, космонавтики и космического приборостроения будет основано на историческом материале освоения космоса;

– для формирования и развития проектной компетенции студентов – будущих педагогов и учителей – будут использованы обоснованные активные педагогические методы: наставничество, кейс-методы, групповые дискуссии;

– студентам – будущим педагогам – будет предоставлена возможность применить полученные знания и отработать проектные навыки

в процессе педагогической практики в рамках созданной системы реализации студенческих проектов совместно со старшеклассниками и практикующими учителями, при этом многие проекты будут представлены на городском и районном уровнях.

Выводы

В процессе изучения существующих методов и приемов, направленных на достижение образовательных целей РПД, принимая во внимание собственный эмпирический опыт, автором статьи были выделены подходы, которые должны служить эффективному формированию у студентов компетенции в области основ астрономии, космонавтики, космического приборостроения, включая навыки организации проектной деятельности в моделировании космических миссий. Для подтверждения эффективности выбранных подходов в период с 2025 по 2026 год планируется проведение педагогического эксперимента, результаты которого будут в дальнейшем использованы в диссертационном исследовании.

Благодарность

Шихову Юрию Александровичу – доктору педагогических наук, профессору, заведующему кафедрой «Физика и оптотехника».

Глушкову Александру Владимировичу – кандидату технических наук, заведующему кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры».

Список использованных источников и литературы

1. Белоус, А. И. Космическая электроника : учеб. пособие / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – Москва : Техносфера, 2015. – 696 с. – URL: <https://www.technosphera.ru/lib/book/388> (дата обращения: 12.03.2025).
2. Парфенова, Т. А. Формирование проектной компетентности будущих педагогов в условиях вуза // Теория и практика общественного развития. – 2013. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-proektnoy-kompetentnosti-buduschih-pedagogov-v-usloviyah-vuza> (дата обращения: 02.12.2024).
3. Чумаков, В. В. Опыт реализации модели наставничества для педагогов на основе курса проектной деятельности по обучению процессу создания учебного контента для цифровых планетариев // Инновации в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании : материалы 29-й Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 20–21 мая 2024 г. / под науч. ред. В. А. Федорова ; Рос. гос. проф.-пед. ун-т. – Екатеринбург, 2024. – 413 с.

V. V. Chumakov, postgraduate

E-mail: chvladis@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Methodological Aspects of Modeling and Design of Space Missions as Part of the Implementation of the Working Program of the Discipline “Radio Engineering and Electronics in Space”

The article discusses possible approaches to the implementation of the working program of the discipline “Radio Engineering and Electronics in space” in the context of the need for the formation and development of students – future teachers of natural science competencies related to the basics of astronomy, cosmonautics, space instrumentation. Special attention is paid to the role of project activities and mentoring in achieving educational goals.

Keywords: scientific competencies, interdisciplinary approach, fundamentals of cosmonautics, project activities, project competencies, mentoring methods

Секция 2. Электротехнические системы и комплексы

УДК 621.341.572

В. В. Бурлака ^{✉ a}, д-р техн. наук, доц.

С. В. Гулаков ^{✉ b}, д-р техн. наук, проф.

А. Ю. Головин, аспирант

E-mail: ^a vburlaka@rambler.ru, ^b gulakov.s.v@yandex.ru

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Россия

Резонансный двунаправленный непосредственный DC-AC-преобразователь*

Предложено схемное решение непосредственного DC-AC-преобразователя, обеспечивающего преобразование постоянного напряжения в переменное с гальванической изоляцией, возможностью работы как с положительной, так и с отрицательной активной мощностью, не имеющего промежуточного звена постоянного тока. Кроме этого, возможно использование такого преобразователя также в режиме неизолированного DC-DC-преобразователя либо неизолированного AC-AC-преобразователя.

Ключевые слова: резонансный преобразователь, непосредственное DC-AC-преобразование, двунаправленный преобразователь, изолированный преобразователь, LLC-преобразователь.

Введение

Задача преобразования постоянного напряжения в переменное или наоборот возникает при создании источников бесперебойного питания (ИБП), зарядных устройств (ЗУ), инверторов связи с сетью возобновляемых источников энергии [1–3]. Иногда также требуется обеспечить гальваническую развязку входных и выходных цепей преобразователя в целях безопасности. Зачастую задачи DC-AC- и AC-DC-преобразования с гальванической развязкой решаются раздельно в два преобразова-

© Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю., 2025

* Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0008.

ния. Например, в ИБП напряжение аккумуляторной батареи (АКБ) может повышаться DC-DC-преобразователем с трансформаторной развязкой, а затем из полученного высокого напряжения неизолированным DC-АС-преобразователем формируется синусоидальное выходное напряжение ИБП для питания нагрузки. Для зарядки аккумуляторов того же ИБП может быть применено ЗУ, состоящее из неизолированного АС-DC-преобразователя (выпрямителя) и последующего DC-DC-преобразователя с изолирующим трансформатором.

Постановка задачи

В целях улучшения массогабаритных и удельных энергетических показателей ИБП, разработки универсальных источников питания и ЗУ представляет интерес синтез схемных решений АС-DC-преобразователей, обеспечивающих: непосредственное преобразование без промежуточного звена постоянного тока с накопителем энергии; гальваническую развязку входных и выходных цепей; возможность двунаправленного потока мощности; отсутствие низкочастотных индуктивных компонентов (трансформаторов), имеющих большую массу и габариты; небольшое число элементов в главной силовой цепи.

Решение задачи

Авторами предложена конструкция двунаправленного изолированного DC-АС-преобразователя, отвечающего требованиям, перечисленным выше. Схема его силовой части приведена на рис. 1.

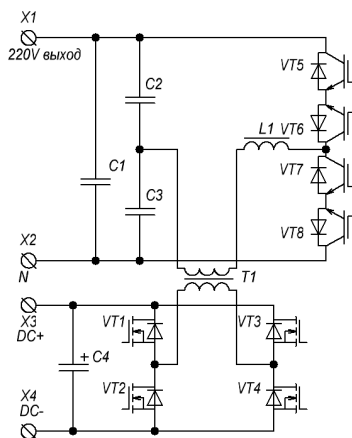


Рис. 1. Схема силовой части двунаправленного непосредственного DC-АС-преобразователя

Преобразователь состоит из 4-транзисторного моста на стороне постоянного напряжения, к выходу которого подключена первичная обмотка высокочастотного трансформатора; со стороны переменного напряжения установлен биполярный полумост, к выходу которого через последовательный резонансный контур подключена вторичная обмотка этого трансформатора. По принципу работы предложенная схема схожа с резонансным LLC-преобразователем, в котором применено совместное частотное и широтно-импульсное управление [4]. Это позволяет обеспечить «мягкое» переключение силовых транзисторов порта переменного напряжения и снизить эквивалентное выходное сопротивление преобразователя за счет работы на резонансной частоте, что является преимуществом предложенной схемы по сравнению с похожим решением, описанным в [3].

Более того, работа на частоте, отличающейся от резонансной, может быть эффективно использована для получения необходимой выходной характеристики (например, при работе в режиме ЗУ или при работе в режиме связи возобновляемого источника с сетью).

Возможен синтез алгоритмов управления таким образом, чтобы обеспечить работу с повышенным коэффициентом мощности [5] со стороны порта переменного напряжения. Также возможна реализация параллельной работы нескольких преобразователей.

Конструкция предложенного преобразователя также позволяет использовать мост со стороны порта постоянного напряжения для обеспечения DC-DC-преобразования (при закороченном порте переменного напряжения), что может быть использовано, например, для «прикуривания» АКБ с разной степенью заряда либо для обеспечения полуавтоматической сварки от АКБ в условиях отсутствия доступа к распределительной сети.

Также возможно использование предложенного преобразователя в режиме бесступенчатого регулятора переменного напряжения. Схема силовой части в этом режиме показана на рис. 2.

Мост со стороны порта постоянного напряжения выводится из работы путем закорачивания вторичной обмотки Т1 за счет открытия транзисторов VT2 и VT4 (рис. 1), резонансная частота контура смещается вниз путем подключения блокировочного конденсатора, а биполярный полумост работает в режиме широтно-импульсного регулирования.

Реле K1 введено для переключения режимов повышения или понижения напряжения. Конденсатор C4 служит для уменьшения резонансной частоты контура L1T1C1C2C3C4 в режиме понижения напряжения.

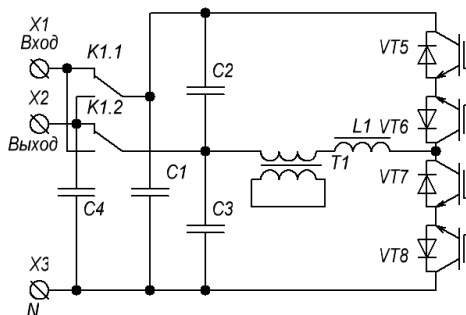


Рис. 2. Схема силовой части при работе в режиме бесступенчатого стабилизатора напряжения

Выводы

Предложенное схемное решение двунаправленного изолированного DC-AC-преобразователя позволяет реализовать несколько функций в одном универсальном устройстве. Это позволяет, например, обеспечить в режиме ИБП бесперебойное питание различной аппаратуры в полевых условиях, обеспечить зарядку АКБ от сети, генератора или возобновляемых источников (солнечных панелей), обеспечить стабилизацию переменного напряжения для питания электроприемников от источников с негарантированным качеством напряжения (например, генераторов). При достаточной мощности возможно также проведение полуавтоматической сварки от АКБ или генератора.

Список использованных источников и литературы

1. *Veerasamy, B.* Bidirectional AC/DC Converter with Improved Power Factor and Reduced DC Ripple for Battery and Photovoltaic Applications :: Doctoral Thesis / Nagoya Institute of Technology. – 2015.
2. A Single-Phase Bidirectional AC/DC Converter for V2G Applications / Tao Peng, Peng Yang, Hanbing Dan, Hui Wang, Hua Han, Jian Yang, Hao Wang, Hui Dong, Patrick Wheeler // *Energies*. – 2017, 10. – P. 881.
3. *Bhattacharjee, A.* An interleaved boost and dual active bridge-based single-stage three-port DC–DC–AC converter with sine PWM modulation / A. K. Bhattacharjee, I. Batarseh // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2020, 68. – Pp. 4790–4800.
4. Bidirectional single stage isolated DC-AC converter / V. Burlaka, S. Gulakov, S. Podnebennaya, E. Kudinova, O. Savenko // *Proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, 05-10 October 2020. – Kharkiv : National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2020. – Pp. 343-346.
5. Power Factor Correction (PFC) Handbook / J. Turchi, D. Dalal, P. Wang, L. Jenck. – Rev. 5. ON Semiconductor, Apr. 2014. – Doc. HBD853/D.

V. V. Burlaka ^{✉ a}, DSc in engineering, assoc. prof.

S. V. Gulakov ^{✉ b}, DSc in engineering, prof.

A. Yu. Golovin, postgraduate

E-mail: ^a vburlaka@rambler.ru, ^b gulakov.s.v@yandex.ru

Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia

Resonant Bidirectional Direct DC-AC Converter

A circuit solution of a direct DC-AC converter is proposed, which provides the conversion of direct voltage to alternating voltage with galvanic isolation, the ability to work with both positive and negative active power, which does not have intermediate direct current chains. In addition, it is also possible to use such a converter in the mode of an insulated DC-DC converter or an uninsulated AC-AC converter.

Keywords: resonant converter, direct DC-AC conversion, bidirectional converter, isolated converter, LLC converter.

УДК 621.341.572*В. В. Бурлака* ^{✉^a}, д-р техн. наук, доц.*С. В. Гулаков* ^{✉^b}, д-р техн. наук, проф.*А. Ю. Головин*, аспирантE-mail: ^a *vburlaka@rambler.ru*, ^b *gulakov.s.v@yandex.ru*

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Россия

Система беспроводной зарядки с функцией балансировки напряжения элементов батареи*

Предложен вариант системы беспроводной зарядки аккумуляторной батареи. Особенностью разработанного схемного решения является активная балансировка напряжений на элементах батареи, что позволяет продлить срок ее службы за счет предотвращения перезаряда отдельных элементов. Кроме того, возможна несложная модификация схемы, которая позволит осуществлять балансировку также и во время работы на нагрузку.

Ключевые слова: беспроводная зарядка, воздушный трансформатор, аккумуляторная батарея, активная балансировка, синхронный выпрямитель, резонансный контур.

Введение

Современные направления развития технологий беспилотных аппаратов (БПА) предполагают увеличение степени их автономности. Одна из задач, которую необходимо решать на этом пути, – организация зарядки бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) БПА в автоматическом режиме. Наиболее удобно зарядку АКБ осуществлять с применением беспроводной передачи энергии. Работы в этом направлении ведутся многими командами исследователей и разработчиков, проводятся эксперименты с использованием разных способов беспроводной передачи энергии с наземной станции на БПА. Наиболее перспективными и близкими к широкому распространению представляются системы «ближнего» поля, использующие индуктивно связанные катушки [1–4].

Постановка задачи

При решении задачи создания системы беспроводной передачи энергии для зарядки АКБ основными целями обычно являются минимизация

© Бурлака В. В., Гулаков С. В., Головин А. Ю., 2025

* Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FRRG-2023-0011.

потерь, снижение массы и габаритов системы (особенно в случае ее установки на летательные БПА). Между тем при зарядке литиевых батарей необходимо пристальное внимание уделять балансировке напряжений их элементов, поскольку перезаряд отдельного элемента может привести к выходу из строя всей батареи (иногда и к возгоранию – из-за большой удельной энергии элементов на основе лития). Балансировка желательна также и при работе батареи на нагрузку, особенно нестационарную и с большой пиковой мощностью.

Решение задачи

Авторами предложено схемное решение приемной части системы беспроводной зарядки, обеспечивающее активную балансировку напряжений элементов АКБ. Схема силовой части приведена на рис. 1.

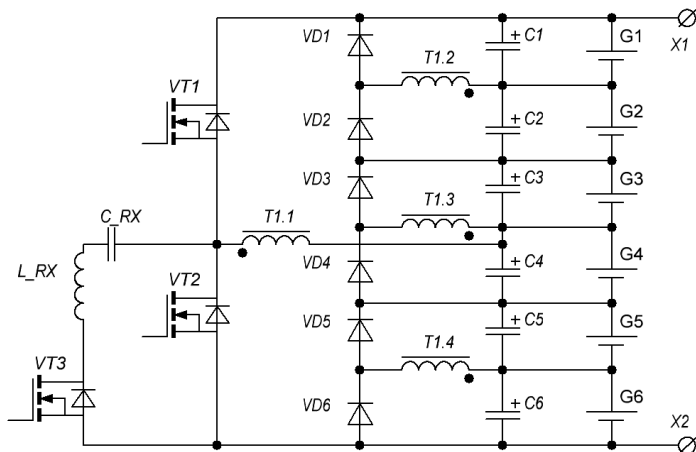


Рис. 1. Схема приемной части системы беспроводной зарядки с активной балансировкой

Схема состоит из приемного последовательного резонансного контура (L_{RX} , C_{RX}), подключенного через электронный ключ VT3 к первичной обмотке высокочастотного трансформатора T1 (T1.1), вторичные обмотки которого (T1.2 – T1.4) имеют равное число витков и подключены через однополупериодные выпрямители к элементам заряжаемой АКБ. При этом количество вторичных обмоток указанного трансформатора в два раза меньше числа элементов в АКБ. Число вит-

ков обмотки Т1.1 в 3 раза больше, чем число витков Т1.2 – Т1.4, это обязательное условие. Предложенная схема имеет принцип работы, схожий с описанным в [5], но за счет применения синхронного выпрямления обеспечивает лучшую балансировку и меньшие потери мощности при работе.

Структура схемы оптимизирована для работы с АКБ, имеющими четное число элементов.

Для обеспечения балансировки элементов АКБ в режиме разряда на нагрузку в схему дополнительно введен полумост на полевых транзисторах VT1 и VT2, шины питания которого подключены к выводам АКБ, а средняя точка транзисторов подключена к дополнительной обмотке высокочастотного трансформатора, второй вывод которой подключен к средней точке АКБ. При необходимости балансировки при работе на нагрузку электронный ключ VT3 размыкается, отключая приемный резонансный контур, и полумост VT1VT2 начинает работу с коэффициентом заполнения, близким к 50 %. В результате происходит перераспределение энергии между элементами АКБ: полумост питается от полного напряжения АКБ, а наличие выпрямителей, питающихся от вторичных обмоток высокочастотного трансформатора, приводит к тому, что максимальный зарядный ток будет сообщаться элементу с минимальным напряжением. Это приводит к тому, что в установившемся режиме напряжения на всех элементах будут равны.

В предложенной схеме также возможно исключение электронного ключа VT3 за счет применения приемного резонансного контура с большим характеристическим сопротивлением и установки частоты переключения полумоста VT1VT2 в режиме активной балансировки значительно выше резонансной частоты этого контура. При этом через L_{RX} , C_{RX} будет протекать небольшой индуктивный ток, не оказывающий существенного влияния на работу схемы.

Также для снижения потерь мощности целесообразно параллельно VT1 и VT2 включить диоды Шоттки, исключив из работы собственные антипараллельные диоды этих транзисторов, а также использовать VT1 и VT2 в режиме синхронного выпрямления при беспроводной зарядке АКБ.

Выводы

Предложено схемное решение приемной части системы беспроводной зарядки АКБ с функцией балансировки напряжения на ее элементах. Схема имеет небольшое количество компонентов в силовой части, несложный алгоритм управления и может быть применена, например, на БПЛА с вертикальным взлетом/посадкой. Имеется также возможность выполнения балансировки напряжений элементов во время разря-

да батареи на нагрузку. Применение предложенного схемного решения позволит продлить срок службы бортовых АКБ и повысить степень автономности БПА.

Список использованных источников и литературы

1. Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones / S. Aldaher, P. D. Mitcheson, J. M. Arteaga, G. Kkelis, and D. C. Yates // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – IEEE, 2017. – Pp. 336–340.
2. *Maulana, E.* Wireless power transfer characterization based on inductive coupling method / E. Maulana, Z. Abidin, W. Djuriatno // 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS). – IEEE, 2018. – Pp. 164–168.
3. *Burlaka, V. V.* Analysis of Approaches to the Efficiency Improvement of Wireless Power Transmission Systems Using Low-Frequency Magnetic Fields / V. V. Burlaka, S. K. Podnebennaya, S. V. Gulakov // Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics And Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 24-26 April, 2018. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. – Pp. 572-575.
4. Wireless Drone Charging Station Using Class-E Power Amplifier in Vertical Alignment and Lateral Misalignment Conditions / A. M. Jawad, R. Nordin, H. M. Jawad, S. K. Gharghan, A. Abu-Samah, M. J. Abu-Alshaeer, N. F. Abdullah // Energies. – 2022. –15, no. 4:1298.
5. *Moghaddam, Ali Farzan.* A Single Transformer for Active Cell Equalization Method of Lithium-Ion Batteries with Two Times Fewer Secondaries than Cells / Ali Farzan Moghaddam, Alex Van den Bossche // Electronics. – 2019. – 8: 951.

V. V. Burlaka ^{✉a}, DSc in engineering, assoc. prof.

S. V. Gulakov ^{✉b}, DSc in engineering, prof.

A. Yu. Golovin, postgraduate

E-mail: ^a vburlaka@rambler.ru, ^b gulakov.s.v@yandex.ru
 Priazovsky State Technical University, Mariupol, Russia

Wireless Charging System with Battery Cell Voltage Balancing Function

A variant of the wireless battery charging system is proposed. A special feature of the developed circuit solution is the active voltage balancing on the battery cells, which makes it possible to extend its service life by preventing overcharging of individual cells. In addition, a simple modification of the circuit is possible, which will allow balancing also during operation under load.

Keywords: wireless charging, air transformer, rechargeable battery, active balancing, synchronous rectifier, resonant circuit.

УДК 621.314.69

А. В. Морозов , канд. техн. наук, доц.

Я. В. Федоров, студент

E-mail: avmoroz16@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Моделирование универсальной системы питания бортовой сети беспилотного летательного аппарата на основе активного выпрямителя

Основными источниками питания в беспилотных летательных аппаратах являются аккумулятор и генератор. ЭДС генератора меняется по частоте и амплитуде, и поэтому для эффективного его использования в системе электропитания необходимы силовые электронные преобразователи напряжения и тока. Такая система может быть реализована на основе активного выпрямителя и импульсного понижающего стабилизатора, что подтверждено результатами моделирования. Предложенная схема обеспечивает распределение нагрузки между источниками энергии и зарядку аккумулятора в режиме малых нагрузок.

Ключевые слова: активный выпрямитель, зарядное устройство, автономная сеть.

Введение

Все большую актуальность приобретает тематика проектирования беспилотных летательных аппаратов различного назначения. На БПЛА с бензиновым двигателем устанавливается двухтактный ДВС, приводящий во вращение тяговый винт, а также бесколлекторную электрическую машину, выполняющую функции стартера и генератора переменного напряжения для питания бортовой сети. Основными требованиями, предъявляемыми к рассматриваемой системе питания, являются возможность функционирования совместно с ДВС во всех расчетных режимах эксплуатации и универсальность.

В процессе пуска ДВС его частота вращения составляет около 1500 об/мин, а при работе на холостом ходу – 2000 об/мин. Для взлета БПЛА двигатель переходит в форсированный режим и частота повышается до 7000 об/мин. Этот же предельный режим используется и для получения максимального ускорения летательного аппарата. Номинальная частота вращения составляет 4000 об/мин. В соответствии с особен-

ностями генератора на основе постоянных магнитов при изменении частоты вращения от 2000 об/мин на холостом ходу до 7000 об/мин в форсированном режиме амплитуда его ЭДС находится в пределах 15...60 В. Поэтому для того чтобы обеспечить подпитку бортовой сети или заряд батареи током генератора при малых значениях ЭДС, требуется повышающий преобразователь напряжения, а при слишком больших значениях ЭДС необходим понижающий преобразователь. Для совместимости с различными ДВС, генераторами и БПЛА, имеющими разные номинальные напряжения, разрабатываемая система должна обладать свойством универсальности и производиться в модульном исполнении.

В соответствии с вышесказанным предлагается реализовать систему электропитания на основе повышающего активного выпрямителя в совокупности с понижающим импульсным стабилизатором, которые должны выполнять функции промежуточных звеньев между генератором и шиной постоянного тока бортовой сети.

Моделирование универсальной зарядно-питающей системы

Основными потребителями бортовой сети являются система авионики, осуществляющая управление ДВС и сервоприводами рулей, которые, в свою очередь, питаются от отдельного преобразователя напряжения. Питающие преобразователи всех узлов системы подключены к промежуточной шине постоянного напряжения 27 В. В качестве источников энергии выступают генератор и аккумуляторная батарея.

Применение повышающего активного выпрямителя вместо обычного повышающего преобразователя позволит использовать его же в инверторном режиме для питания статора бесколлекторной машины от аккумуляторной батареи в режиме пуска ДВС. Активный выпрямитель имеет в своей основе транзисторный мостовой преобразователь. Со стороны сети переменного тока должны присутствовать индуктивности, что позволит увеличивать напряжение на шине постоянного тока относительно амплитуды переменного напряжения.

Основным преимуществом активного выпрямителя является возможность получения практически синусоидальных входных токов, что должно снизить потери мощности в генераторе от высших гармоник тока статора [1, 2]. В качестве входных индуктивностей предполагается использовать индуктивности статорных обмоток генератора. Это решение позволяет избежать установки дополнительных дросселей, что уменьшит вес выпрямителя. Повышение напряжения осуществляется за счет накопления магнитной энергии в индуктивностях при кратковременном замыкании ключей схемы и последующего ее высвобождения с появлением ЭДС самоиндукции. Из-за наличия обратных диодов

в полевых транзисторах активный выпрямитель не может работать в режиме понижения напряжения.

Понижение и стабилизацию напряжения может обеспечить простейшая транзисторная схема понижающего преобразователя. Она состоит из полевого транзистора, сглаживающего импульсного дросселя и обратного диода. Активный выпрямитель работает в режиме повышения напряжения, когда амплитуда ЭДС генератора составляет от 15 до 27 В. В это время транзистор понижающего преобразователя открыт и пропускает ток в нагрузку. Понижающий преобразователь включается в работу, когда амплитуда ЭДС генератора выше 27 В. В этом режиме транзисторы активного выпрямителя закрыты и переменный ток выпрямляют обратные диоды этих транзисторов.

Схема предлагаемого устройства смоделирована в среде SimInTech, выбор в пользу которой был сделан, в большей степени, благодаря наличию готовой модели активного выпрямителя. Модель системы (рис. 1) включает в себя имитатор генератора на постоянных магнитах, состоящий из источника трехфазной ЭДС, амплитуда и частота которого пропорциональны, блок инвертора и электрические элементы, из которых состоит схема понижающего импульсного преобразователя.

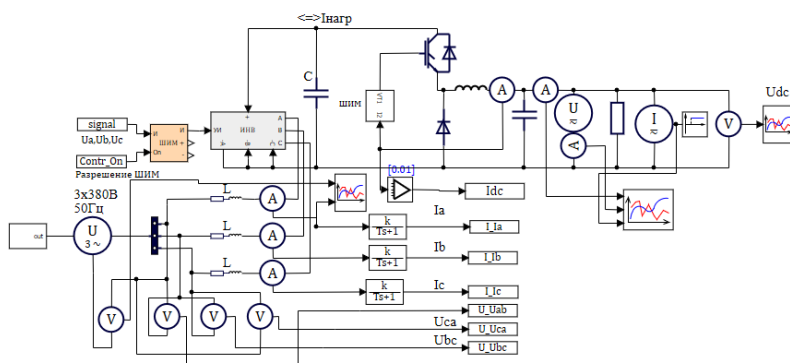


Рис. 1. Модель универсальной зарядно-питающей системы

Источник напряжения на выходе преобразователя заменяет аккумуляторную батарею, а источник тока позволяет имитировать различную нагрузку. Система управления активным выпрямителем представлена блоком PWM и работает в режиме регулирования тока с обратными связями по датчикам трехфазного напряжения и тока. Система управления понижающим преобразователем также стабилизирует выходной ток по сигналу датчика.

Внутренняя схема блока PWM (рис. 2) содержит внешний контур регулирования выходного тока с ПИ-регулятором PU [3, 4]. Блок преобразования координат $ABC \Rightarrow XY$ вычисляет проекции вектора трехфазного тока во вращающейся системе отсчета, связанной с вектором напряжения. Проекция тока на поперечную ось Y задается нулевой, а заданием продольного тока по оси X является выход регулятора PU. Выходные сигналы регуляторов PI_x и PI_y после ограничителя и компенсатора поперечных связей поступают в блок обратного преобразования координат $XY \Rightarrow ABC$ и формируют выходные напряжения инвертора, функционирующего в режиме автономного выпрямителя.

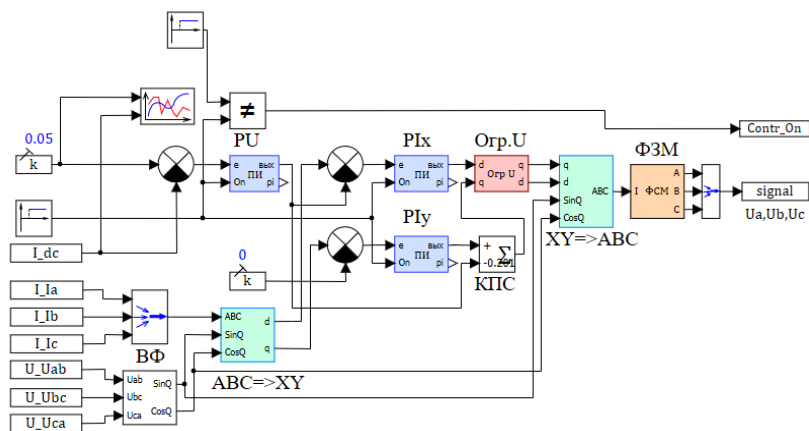


Рис. 2. Схема управления активным выпрямителем

В качестве примера функционирования модели выбран режим монотонного роста амплитуды и частоты генератора (рис. 3) как при пуске и разгоне ДВС. В момент $t = 0,02$ с запускается активный выпрямитель в режиме стабилизации выходного тока на уровне 5 А. При $t_1 = 0,3$ с ЭДС генератора достигает порогового значения, при превышении которого активный выпрямитель неспособен стабилизировать ток, его транзисторы выключаются и далее он работает как неуправляемый диодный выпрямитель.

В течение времени t_2 вследствие продолжающегося роста ЭДС генератора увеличивается выходной ток выпрямителя, а затем включается в работу понижающий стабилизатор тока, который питает нагрузку на интервалах t_3 и t_4 . Нагрузка смоделирована резистором 20 Ом и источником тока, ток которого на интервале t_4 скачком изменяется от нуля до 8 А. Следовательно, на интервалах $t_1 \dots t_3$ только незначительная доля

тока преобразователя, около 1,25 А, потребляется нагрузкой, а остальные 3,75 А заряжают аккумулятор. На интервале t_4 нагрузку питают и преобразователь и аккумулятор, токи которых складываются: $5 + 3 = 8$ А.

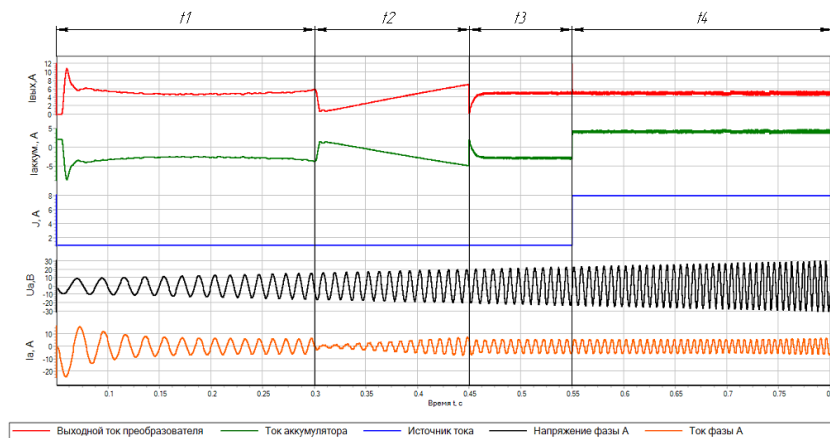


Рис. 3. Входные и выходные величины модели

Выводы

Предложенная схема обеспечивает распределение нагрузки между источниками энергии и зарядку аккумулятора в режиме малых нагрузок. Осциллограммы подтверждают синусоидальность входных токов выпрямителя, но переключения режимов работы схемы сопровождаются переходными процессами токов.

Список использованных источников и литературы

1. Розанов, Ю. К. Силовая электроника : учеб. для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, А. А. Кваснюк. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2009. – 633 с.
2. Krylov, D. Active rectifier with different control system types // 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2010. – URL: <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263226> (дата обращения: 14.11.2024).
3. Pavlova, Y. The synthesis of a control system of the active rectifier / Y. Pavlova // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – URL: <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317244> (дата обращения: 14.11.2024).
4. Модельно-ориентированное проектирование. Построение активного выпрямителя // Хабр. Россия. – URL: <https://habr.com/ru/articles/509160/> (дата обращения: 14.11.2024).

A. V. Morozov , CSc in engineering, assoc. prof.

Ya. V. Fedorov, student

E-mail: avmoroz16@rambler.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Modeling of the Universal Power Supply System for On-Board Network of Unmanned Aerial Vehicle Based on Active Rectifier

The main power sources in unmanned aerial vehicles are a battery and a generator. The EMF of the generator varies in frequency and amplitude, and therefore, electronic power converters of voltage and current are required for its effective use in the power supply system. Such a system can be implemented on the basis of an active rectifier and a pulse step-down stabilizer, which is confirmed by the simulation results. The proposed scheme provides load distribution between energy sources and battery charging in low-load mode.

Keywords: active rectifier, charging device, autonomous network.

УДК 621.3(04)*М. В. Тюлькин* ^{✉^a}, доцент*Р. И. Галеев* ^{✉^b}, магистрантE-mail: ^a mpu5-30@yandex.ru, ^b brusya.galeev.89@mail.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработка лабораторного стенда по изучению программируемого реле Zelio Logic

В работе отражены результаты разработки лабораторного стенда на базе программируемого реле ZelioLogic, предназначенного для учебных заведений высшего и среднего профессионального образования. Рассмотрены основные примеры применения подобных устройств. Приведены программы, на базе которых строится выполнение программного задания контроллером, позволяющие реализовать дополнительные функциональные возможности устройства.

Ключевые слова: программируемое реле, Zelio Logic, Zelio Soft 2.

Введение

Наличие лабораторного оборудования по изучению широко используемых в настоящее время программируемых реле типа Овен, Zelio Logic, EKF и др. необходимо для обучения студентов и подготовки специалистов в области электротехники и электроники. С помощью такого оборудования можно изучить принцип работы реле, его характеристики, а также проверить правильность функционирования реле в устройствах автоматики.

Основная часть

ПЛК – это программируемый логический контроллер, электронное логическое устройство для автоматического управления оборудованием и технологическими комплексами. Он формирует и отправляет команды согласно заданной программе с обратной связью по одному или нескольким параметрам [1]. В иерархии ПЛК существует множество устройств, предназначенных для тех или иных задач. Одним из них является программируемое реле.

Программируемые реле находят применение при автоматизации производственных процессов на промышленных предприятиях, транс-

портной инфраструктуре, жилищно-коммунальном хозяйстве и других отраслях. Программируемые реле в основном применяются как коммутирующие элементы, управляющие работой узлов, устройств различного электрооборудования (чаще всего электродвигателями, приборами осветительных сетей и другими объектами), нуждающихся в дистанционном автоматическом управлении.

Отличие программируемых реле от контроллеров ПЛК состоит в объеме обрабатываемой информации и быстродействии. Такое отличие объясняется сравнительно малыми объемами программной/оперативной памяти и небольшим количеством портов ввода-вывода.

Перечисленные ограничения не позволяют расширить область применения этих устройств до уровня более универсальных систем. Именно поэтому программируемые реле в основном применяются в более простых ситуациях (рис. 1), например:

- при необходимости автоматизации работы отдельных агрегатов;
- для управления бытовыми и промышленными системами освещения;
- с целью коммутации режимов работы промышленного оборудования и бытовой техники [2].

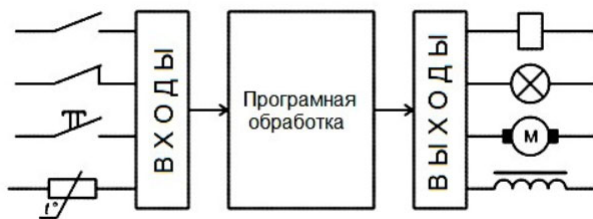


Рис. 1. Условная схема применения программируемых реле

В качестве изучаемого программируемого логического контроллера выбрано реле Zelio Logic серии SR3B261BD от производителя Schneider Electric. Zelio Logic может быть запрограммирован с использованием нескольких языков программирования, включая лестничную логику – Ladder Logic, функциональную блочную диаграмму – Function Block Diagram, FBD.

Zelio Logic

Zelio Logic предлагает ряд преимуществ по сравнению с традиционными реле и логическими элементами:

- простота программирования: Zelio Soft 2 – это бесплатное программное обеспечение, которое позволяет пользователям создавать программы на основе лестничной логики (Ladder Diagram, LD) без необходимости знания сложных языков программирования;
- быстродействие: благодаря использованию технологии CPLD (Complex Programmable Logic Device) Zelio Logic обеспечивает быстрое время отклика и высокую скорость обработки сигналов;
- надежность: Zelio Logic использует высококачественные компоненты и имеет длительный срок службы, что обеспечивает стабильную работу системы в течение длительного времени;
- экономичность: Zelio Logic является более доступным решением по сравнению с другими ПЛК, что делает его привлекательным для малого и среднего бизнеса [3].

Структура лабораторного стенда

Предлагаемая структурная схема лабораторного стенда приведена на рис. 2.

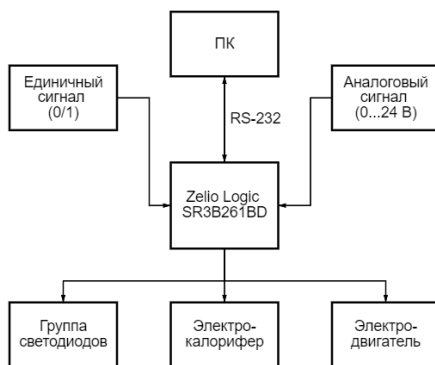


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда

В качестве управляющих единичных сигналов используется цепь от источника питания напряжением 24 В, коммутируемая тумблерами S1–S5. Эти сигналы подаются на дискретные входы устройства Zelio Logic серии SR3B261BD. В качестве источника аналогового сигнала используется падение напряжения на потенциометре, имитирующем работу терморезистора, которое подается на аналоговые входы устройства. Для загрузки программы предусмотрено подключение ПК через интерфейс RS-232. Программа предварительно составляется в среде

Zelio Soft на языке FBD. Релейные выходы устройства Zelio Logic подключены к группе индикаторных светодиодных ламп, электродвигателю и модели, демонстрирующей работу электрокалорифера.

Принципиальная схема лабораторного стенда приведена на рис. 3.

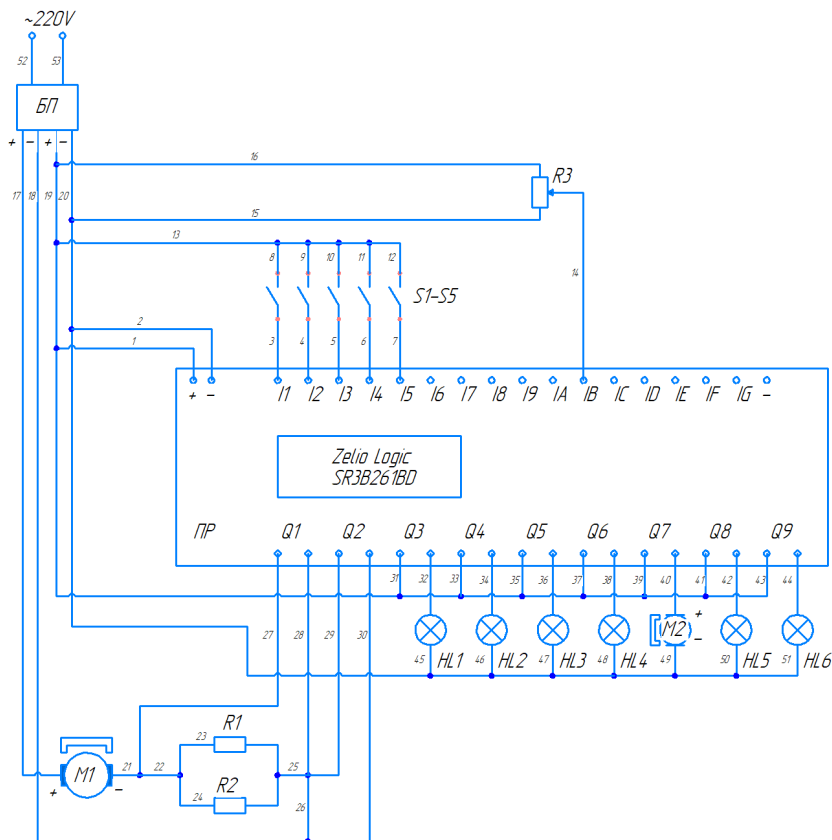


Рис. 3. Принципиальная схема лабораторного стенда

Разработка программ

Программирование реле Zelio Logic в FBD (функциональная блочная диаграмма) включает в себя использование различных функциональных блоков для создания логических операций и управления устройствами.

Для каждой лабораторной работы создание программы производится в среде Zelio Soft 2. Большинство лабораторных работ связано с реали-

заций распространенных технологических процессов, что позволит студентам с большим пониманием относиться к устройству интеллектуального реле и его применению.

Изучение логических элементов

Логические элементы составляют основу работы вычислительной техники и используются для создания условных конструкций, циклов и элементов управления потоком выполнения программы.

В этой лабораторной работе преследуется цель изучить работу логических операторов путем различных операций с логическим нулем и единицей. За логическую единицу и ноль отвечает положение тумблера S1–S5. Если один из них замкнут, на дискретный вход реле поступает сигнал – логическая единица. Если он разомкнут, на вход реле сигнал не поступает, это логический ноль.

Студенту необходимо познакомиться со всеми логическими операторами, представленными в программе Zelio Soft 2. Результатом его работы является заполненная таблица истинности для логических операторов, таких как И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, на основании составленной схемы и полученных сигналов на стенде.

Пример такой программы приведен на рис. 4.

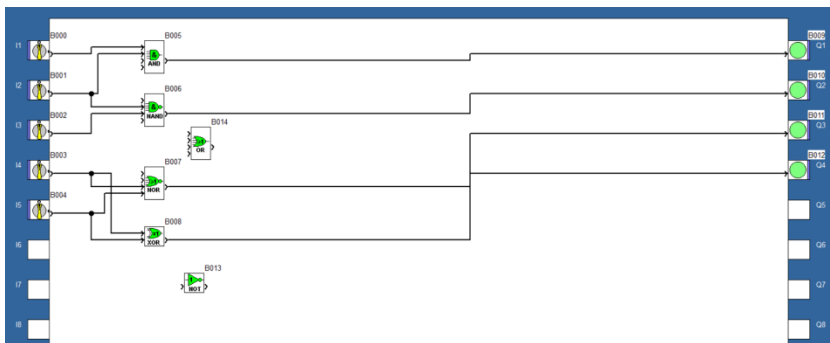


Рис. 4. Пример программы «Логические элементы» в приложении Zelio Soft 2

Автоматизация управления работой электрокалорифера

Электрокалорифер предназначен для обогрева помещений путем нагрева проходящего через него воздуха. Он работает по принципу электрического нагревателя, используя нагревательный элемент для преобразования электрической энергии в тепловую, а вентилятор нагнетает воздух через нагревательный элемент и обеспечивает его циркуляцию [4].

Моделирование работы электрокалорифера происходит следующим образом: вентилятор, подключенный к выходу реле, имитирует нагнетание воздуха в калорифер. С помощью реостата R3 осуществляется имитация датчика температуры – терморезистора. Две индикаторные лампы сигнализируют о режиме работы электрокалорифера: если красная лампа горит, следовательно, ТЭН включен и электрокалорифер работает в режиме обогрева, если загорается синяя лампа – ТЭН выключен, электрокалорифер работает в режиме охлаждения. Студентам в лабораторной работе необходимо научиться с помощью реостата и индикации на стенде правильно настраивать значения в блоке значений с выхода аналогового сигнала в программе Zelio Soft 2. Пример программы управления электрокалорифером приведен на рис. 5.

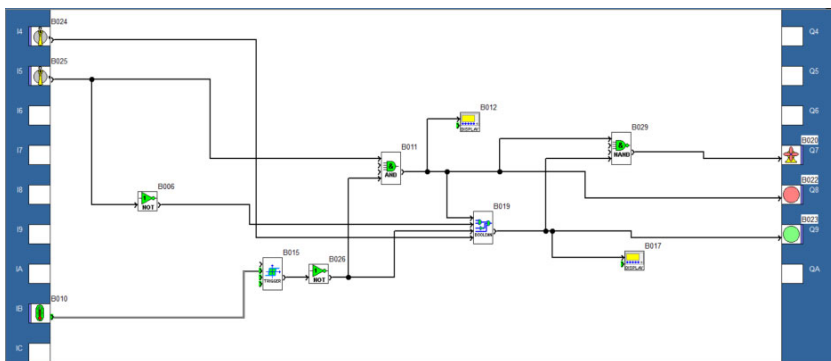


Рис. 5. Пример программы «Управление электрокалорифером» в приложении Zelio Soft 2

Автоматизированное управление секциями освещения

Автоматизация системы освещения на производстве позволяет повысить энергоэффективность, создать комфортные условия труда и сократить расходы на электроэнергию. Программируемое реле позволяет организовать управление освещением с помощью датчиков, таймеров и других устройств, в частности, включать и выключать светильники в определенное время в зависимости от уровня освещенности или присутствия людей в помещении.

На стенде в качестве светильников выступают четыре индикаторные светодиодные лампы, имитируя работу секций освещения какого-либо помещения или его части. На стенде реализовано четыре секции освещения, т. е. одна лампа – одна секция.

Пример программы приведен на рис. 6.

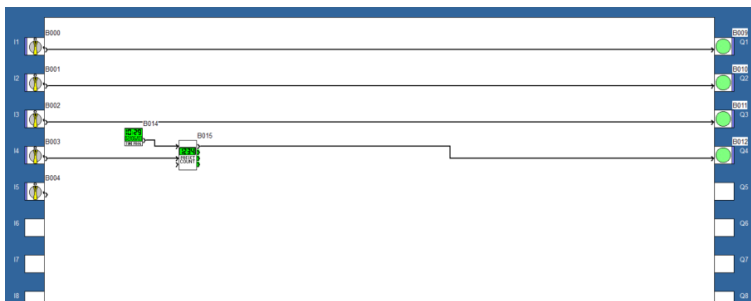


Рис. 6. Пример программы «Управление освещением» в приложении Zelio Soft 2

Автоматизация управления работой электродвигателя

Одно из основных направлений применения программируемого реле является автоматизация управления работой электродвигателя.

На стенде реализован ступенчатый пуск двигателя постоянного тока функции времени. К релейным выходам устройства подключена группа сопротивлений, с течением времени контроллер с помощью таймера выводит из схемы сопротивление, пока электродвигатель не достигнет номинальной скорости вращения вала. Из уравнения (1) в начальный момент пуска $n = 0$, $E_a = 0$, $I_\Pi = \frac{U}{R_a}$. Отсюда получаем, что $R_a = \frac{U}{I_\Pi} = 9,6 \text{ Ом}$, где $I_\Pi = 2,5 \text{ А}$. Исходя из уравнения (2) получаем, что $R_\Pi = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} - R_a = 6,4 \text{ Ом}$. В стенде в качестве первой ступени используются два резистора типа ПЭВ-25 12 Ом, соединенные параллельно.

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}; \quad (1)$$

$$I_\Pi = \frac{U_{\text{ном}}}{R_a + R_\Pi}. \quad (2)$$

Пример программы управления работой двигателя приведен на рис. 7.

Выводы

Для изучения и формирования у студентов навыков применения программируемого реле Zelio Logic в системах автоматизации технологических процессов разработан лабораторный стенд в моноблочном исполнении. Стендом предусмотрено использование программируемого реле Zelio Logic при автоматизации трех вариантов технологических процессов управления: работой электрокалорифера, системой освещения и электродвигателем. Также лабораторный стенд позволяет реализовывать автоматизацию и разработку новых систем управления на основе программируемых реле.

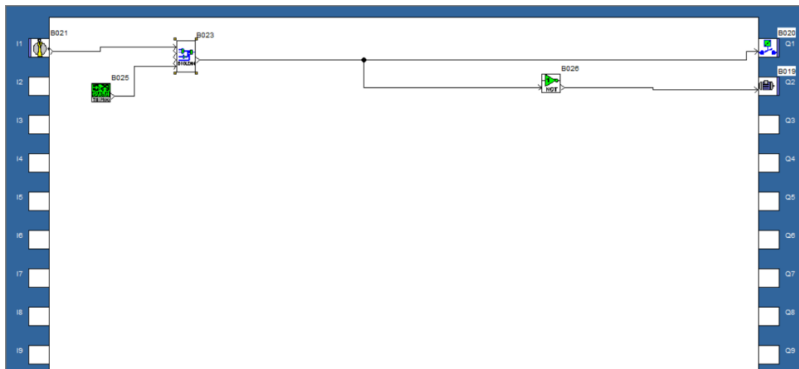


Рис. 7. Пример программы «Управление электродвигателем» в приложении Zelio Soft 2

Список использованных источников и литературы

1. Программируемый логический контроллер (ПЛК). – URL: https://www.equipnet.ru/articles/tech/tech_54826 (дата обращения: 20.10.2024).
2. Интеллектуальные реле. – URL: https://finestart.school/media/smart_relay (дата обращения: 20.10.2024).
3. Реле интеллектуальной конструкции серии Zelio Logic. – URL: https://fgrus.ru/articles/zelio_logic/ (дата обращения: 20.10.2024).
4. Калориферы: устройство, назначение, типы и аналоги. – URL: <https://energo1.com/blog/kalorifery/> (дата обращения: 20.10.2024).

M. V. Tulkin ^a, assoc. prof.

R. I. Galeev ^b, master student

E-mail: ^a mpu5-30@yandex.ru, ^b brusya.galeev.89@mail.ru
 Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development of a Laboratory Stand for the Study of a Programmable Relay Zelio Logic

The paper reflects the results of the development of a laboratory stand based on the Zelio Logic programmable relay, designed for educational institutions of higher and secondary vocational education. The main examples of the use of such devices are considered. The programs on the basis of which the execution of the program task by the controller is based, allowing to implement additional functionality of the device, are given.

Keywords: programmable relay, Zelio Logic, Zelio Soft 2.

Секция 3. Физические методы и приборы измерений, контроля, диагностики

УДК 004.89:621.548.4

Х. С. Аль Уатик ^{✉ a}, аспирант
С. П. Пронин ^{✉ b}, д-р техн. наук, проф.
E-mail: ^a alh@dr.com, ^b sppronin@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
Барнаул, Россия

Сравнительный анализ моделей глубокого обучения для диагностики редукторов ветряных турбин

В работе исследуются методы предиктивного обслуживания редукторов ветряных турбин с использованием алгоритмов глубокого обучения, включая LSTM, CNN и гибридные подходы. Производительность моделей сравнивалась по таким показателям, как полнота, точность и специфичность. Гибридная модель, объединяющая CNN и метод случайного леса, показала наилучшие результаты для промышленного применения, повышая надежность прогнозирования и снижая риск отказов.

Ключевые слова: глубокое обучение, предиктивное обслуживание, редукторы, ветряные турбины, CNN, LSTM, гибридные модели.

Введение

Редукторы являются ключевым элементом ветряных турбин, обеспечивающим их надежную и эффективную работу. Отказы редукторов приводят к значительным экономическим потерям из-за вынужденных простоев. Традиционные методы предиктивного обслуживания часто испытывают трудности при анализе сложных и высокоразмерных данных. Современные подходы, такие как глубокое обучение (CNN, LSTM), демонстрируют более высокую точность благодаря выявлению скрытых закономерностей.

Новизна исследования заключается в использовании гибридных моделей, объединяющих возможности глубоких сетей и устойчивость алгоритмов, таких как случайный лес. Это сочетание позволяет улучшить прогнозы и адаптировать модели к реальным условиям эксплуатации. Практическая значимость работы подтверждается важностью редукторов в промышленном применении и необходимостью повышения их надежности [5]. Анализ проводился на основе инженерно обработанных признаков эксплуатационных данных ветряных турбин для определения оптимального подхода к предиктивному обслуживанию.

Методы и материалы исследования

Исследование основано на наборе данных, содержащих инженерно обработанные признаки, извлеченные из эксплуатационных данных ветряных турбин с акцентом на производительность редукторов. Признаки включали статистическую и спектральную информацию, полученную с датчиков вибрации. На этапе предварительной обработки целевая переменная (наличие или отсутствие неисправности) была закодирована, а признаки стандартизированы для повышения сходимости алгоритмов глубокого обучения.

Математическое определение модели предиктивного обслуживания представлено следующим образом:

$$P(t) = E[f(X_t, \theta)] = \sigma\left(\sum_{i=1}^n \omega_i x_{t,i} + b\right), \quad (1)$$

где b – смещение; $x_{t,i}$ – входные признаки; ω_i – веса; σ – сигмоидная функция активации; θ – параметры модели; X_t – вектор входных признаков; E – математическое ожидание, усредняющее функцию $f(X_t, \theta)$; $P(t)$ – предсказанная вероятность отказа в момент времени t .

Архитектуры моделей глубокого обучения

В данном исследовании были рассмотрены три основные модели:

1. **Модель CNN:** предназначена для выявления пространственных закономерностей. В ее архитектуре используются слои свертки максимального объединения и dropout для предотвращения переобучения, а также пакетная нормализация для повышения стабильности обучения.

2. **Модель LSTM:** обеспечивает сохранение долгосрочных зависимостей, что делает ее подходящей для анализа временных последовательностей. Архитектура включает слой LSTM, дополненный полностью связными и dropout-слоями для повышения устойчивости к переобучению.

3. **Гибридная модель:** в данной конфигурации CNN или LSTM извлекают признаки, которые классифицируются методом случайного

леса (Random Forest). Такой подход сочетает способность глубоких моделей выявлять сложные закономерности с устойчивостью случайного леса к шуму и выбросам. Выход модели описывается следующим образом:

$$\text{Hybrid Output} = RF(CNN(X) \text{ or } LSTM(X)). \quad (2)$$

Экспериментальная установка

Обучение моделей проводилось в течение 150 эпох с использованием фиксированной скорости обучения 0,0001. В обучающие данные был добавлен шум для повышения способности моделей к обобщению. Производительность моделей оценивалась по метрикам: F1-мера, полнота, точность и аккуратность. Данный набор метрик был выбран для обеспечения всесторонней оценки точности прогнозов, способности моделей к обобщению и устойчивости к различным типам данных. Для объективной оценки результаты тестировались на отдельном наборе данных. Такой подход обеспечил всестороннее сравнение возможностей предложенных моделей глубокого обучения и их гибридных вариаций, применяемых для предиктивного обслуживания редукторов ветряных турбин.

Результаты исследования

Проведен сравнительный анализ моделей глубокого обучения: CNN, LSTM и гибридной модели, объединяющей CNN/LSTM с методом случайного леса. Модель CNN продемонстрировала высокую точность при распознавании пространственных признаков (83,3 %), однако имела ограничения при обработке временных последовательностей. Модель LSTM эффективно улавливала долгосрочные зависимости (72,2 %), но оказалась более подверженной переобучению [2]. Наилучшие результаты показала гибридная модель, достигнув точности 90,0 %, что обусловлено сочетанием способности CNN/LSTM выявлять сложные закономерности и устойчивости случайного леса к шумам и выбросам в данных [1].

На рисунке представлено сравнение потерь моделей, которое демонстрирует, что гибридная модель имеет более устойчивую кривую потерь, обеспечивая оптимальный баланс между сходимостью и способностью к обобщению [2].

Функциональные свойства рабочих поверхностей зубчатых передач, такие как износостойкость и структурная целостность, играют ключевую роль в повышении надежности оборудования, что также подтверждается исследованиями в области проектирования зубчатых механизмов [5].

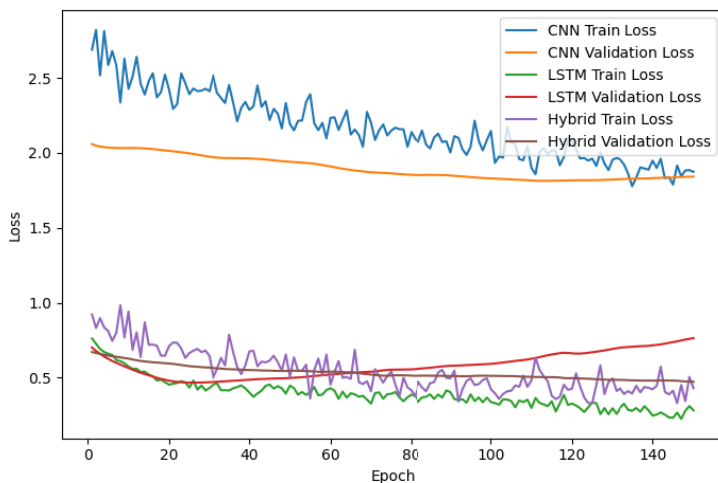


Рис. 1. Сравнение динамики потерь моделей

Гибридная модель показала большее количество истинно положительных и меньшее количество ложноотрицательных результатов, что подтверждает ее высокую точность и пригодность для промышленного применения. Полученные результаты подчеркивают, что гибридные архитектуры способны лучше обобщать данные, эффективно улавливая их разнообразные характеристики [1, 2]. Однако обучение гибридной модели потребовало большего объема вычислительных ресурсов, что свидетельствует о необходимости компромисса между точностью и вычислительной эффективностью.

Высокий показатель полноты гибридной модели указывает на ее потенциал для раннего обнаружения неисправностей. Хотя модели LSTM и CNN продемонстрировали хорошие результаты при работе по отдельности, их интеграция с методом случайного леса обеспечивает оптимальное сочетание точности и устойчивости [3].

Заключение

Настоящее исследование подтвердило высокую точность и перспективность гибридной модели, интегрирующей CNN и случайный лес, для предиктивного обслуживания редукторов ветряных турбин. Практическая значимость заключается в ее адаптации для отраслей, требующих точной диагностики, включая промышленную робототехнику [6].

Для применения модели в реальном времени потребуются оптимизация вычислительных ресурсов и интеграция данных с сенсоров. Буду-

шие исследования сосредоточатся на разработке адаптивных методов и повышении устойчивости к шуму, что будет способствовать ее применению в сложных условиях эксплуатации.

Список использованных источников и литературы

1. Deep learning and its applications to machine health monitoring: A comprehensive review / R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, R. X. Gao // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 115. – Pp. 213–237. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>.
2. Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Using Vibration Scatter Plot and Visual Geometric Group Network / M.-H. Wang, C.-C. Hung, S.-D. Lu, F.-H. Chen, Y.-X. Su, C.-C. Kuo // *Processes*. – 2024. – Vol. 12 (5). – P. 985. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12050985>
3. *Al Ouatiq, H. S.* Optimized Model for Gearbox Fault Detection: A Random Forest Approach Using Vibration Data / H. S. Al Ouatiq, S. P. Pronin // *Нейроинформатика, её приложения и анализ данных : материалы XXXII Всерос. семинара, 27 сент. 2024 г. – Красноярск : ИВМ СО РАН, 2024. – С. 3–8.*
4. *Трубачев, Е. С.* Инновации в инженерии и технологии червячных передач // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 16–25. – DOI: [10.22213/2413-1172-2024-3-16-25](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-3-16-25)
5. *Шеховцева, Е. В.* Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей / Е. В. Шеховцева, Т. В. Шеховцева // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 16–25. – DOI: <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2023-3-16-25>

H. S. Al Ouatiq ^a, postgraduate

S. P. Pronin ^b, DSc in engineering, prof.

E-mail: ^a alh@dr.com, ^b sppronin@mail.ru

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Comparative Analysis of Deep Learning Models for Gearbox Diagnostics in Wind Turbines

This paper explores methods for predictive maintenance of wind turbine gearboxes using deep learning algorithms, including LSTM, CNN, and hybrid approaches. The performance of the models was compared in terms of completeness, accuracy, and specificity. The hybrid model combining CNN and the random forest method has shown the best results for industrial applications, increasing prediction reliability and reducing the risk of failures.

Keywords: deep learning, predictive maintenance, gearboxes, wind turbines, CNN, LSTM, hybrid models.

УДК 620.179.16

Д. И. Ашихмин[✉], студент

E-mail: 2407danil@mail.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Выбор аппаратной платформы для макетирования высокоскоростного акустического дефектоскопа прутков, реализующего зеркально-теневой метод на многократных отражениях*

В статье рассмотрены варианты платформ для реализации цифровой части регистрации и обработки сигнала, дефектоскопа ДЭМА. На основании требований производительности и особенностей реализации программы произведен выбор ПЛИС.

Ключевые слова: производительность, зеркально-теневой метод на многократных отражениях, сканирование, аппаратно-программный комплекс.

Введение

С увеличением темпов производства отечественной продукции возрастает спрос на неразрушающий контроль металлических объектов. Распространение получают методы, использующие электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП) [1–4]. Одним из подобных методов является зеркально-теневой метод контроля на многократных отражениях с использованием электромагнитно-акустических (ЭМА) датчиков, применяемый для контроля прутков, проволок и стержней [5–7]. Акустический импульс возбуждается на поверхности тела прутка и распространяется вглубь, а впоследствии многократно отражается от его противоположной поверхности. При контроле фиксируются многократные отражения импульса, проходящего через сечение объекта контроля, от поверхности объекта [8, 9]. Для объектов с цилиндрической поверхностью используют волны Рэлея и реализуют метод многократной тени [10–13].

© Ашихмин Д. И., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Форма огибающей серии импульсов, получаемая при контроле, зависит от ряда характеристик объекта контроля. Форма зависит от наличия включений и несплошностей, отличающихся по акустическим свойствам от материала объекта контроля, его структуры, нарушений правильности формы и т. д. [14–19]. Метод реализован на аппаратно-программном комплексе «Дефектоскоп ДЭМА», являющемся частью уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, в лабораторной версии которого получение и обработка данных производится компьютерным блоком с установленной в него платой АЦП [20–22].

По оцифрованным платой АЦП данным, программа ПРИНЦ X Fast строит эхограмму импульсов. На рис. 1 представлена эхограмма, полученная на прутке диаметром 10 мм. Длина временной оси составляет 600 мс. На эхограмме присутствует зондирующий импульс (в ограничении) и набор эхо-импульсов (донных импульсов), полученных в результате многократно отраженных от поверхности прутка. Часть донных импульсов в начале эхограммы находится в зоне с помехами от зондирующего импульса. До начала измерений пользователь производит настройку программного обеспечения для получения эхограммы с требуемыми параметрами.

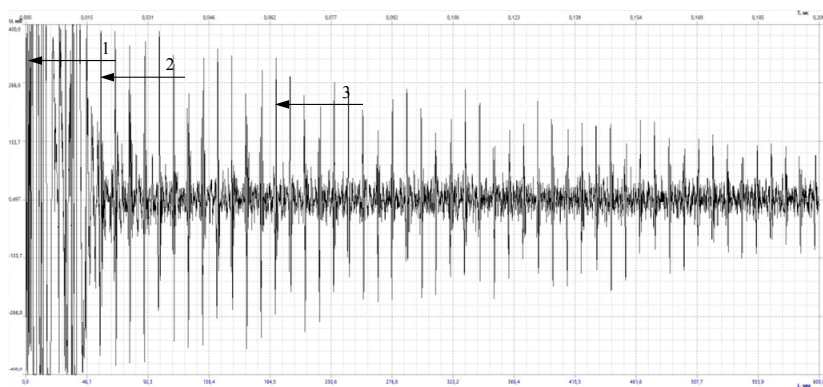


Рис. 1. Зарегистрированный сигнал в виде эхограммы, усреднение 32, без фильтрации: 1 – зондирующий импульс; 2 – 6-й донный импульс; 3 – 18-й донный импульс

Проблемой при использовании методов на основе ЭМА-датчиков является задержка, создаваемая при математической обработке данных ввиду особенностей работы ЭМА (низкая чувствительность). Времен-

ные задержки в процессе измерений делают невозможным сканирование во время производственных процессов при скоростном движении объектов контроля.

Целью данной работы является выявление возможности и методов модернизации дефектоскопа ДЭМА для уменьшения временных задержек при скоростном перемещении датчика вдоль сканируемого объекта.

Постановка задачи

Для улучшения отношения уровня шума к полезному сигналу из-за низкой чувствительности ЭМА-датчика необходимо проводить усреднение сигнала по нескольким измерениям. Однако в процессе измерений возникают задержки из-за большого массива обрабатываемых данных и особенностей работы аналогового блока, усиления и синхронизации, применяемых плат АЦП, специфики работы применяемой операционной системы компьютерного блока [23, 24]. При эксплуатации в лабораторных условиях или ручном режиме сканирования временные задержки незначительны, однако они не позволяют реализовать высокоскоростной метод контроля при сохранении достоверности. Задачей является выбор нового схемотехнического решения для реализации системы, позволяющего производить мониторинг объекта контроля с временными затратами, приближенный к времени непосредственных измерений.

Технические требования

Указанные выше недостатки могут быть устранены при построении конфигурации дефектоскопа на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Структурная схема дефектоскопа при этом может иметь вид, представленный на рис. 2.

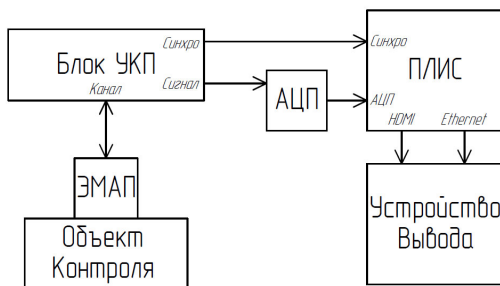


Рис. 2. Структурная схема дефектоскопа

Измерительная система должна обеспечивать усиление входного сигнала с изменяемым коэффициентом усиления, оцифровку с частотой не менее 100 МГц, разрядностью 8 или более бит, усреднение эхограммы по 32 или более измерениям и частотную фильтрацию по уровню выше 5 МГц. Блок математической обработки должен иметь размеры, не превышающие 300×350×50 мм. Размер необходимой оперативной памяти блока не менее 0,6 ГБ. Исходя из требований, разработана структурная схема приемно-усилительного тракта, показанная на рис. 3.

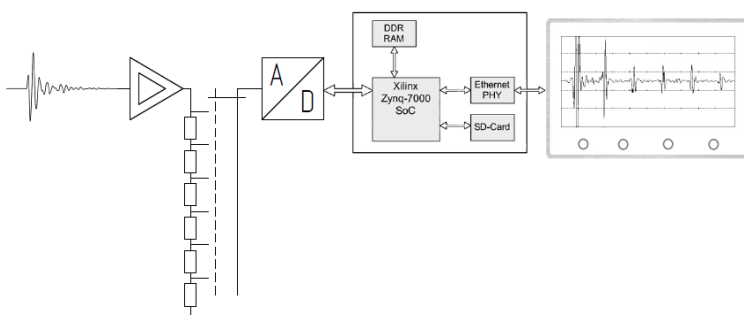


Рис. 3. Структурная схема приемно-усилительного тракта

Расчет технических характеристик

В качестве блока математической обработки удобно использовать отладочную плату на микросхеме ПЛИС. Отладочные платы позволяют многократно изменять выполняемую схемой программу и содержат различные интерфейсы передачи данных и оптимизированную разводку памяти и обвязки схемы ПЛИС.

На основе отладочной платы ПЛИС необходимо реализовать программу, схема которой представлена на рис. 4.

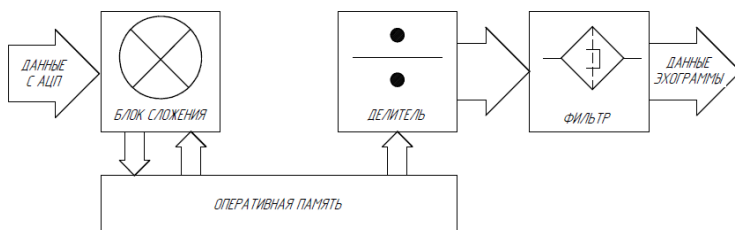


Рис. 4. Структурная схема программы обработки данных

Реализовывать дефектоскоп следует на распространенных микро-схемах ПЛИС с возможностью перепрошивки для возможности модификации программы в процессе разработки устройства. Для реализации макета дефектоскопа выбрана схема Xilinx Zynq 7000 на базе процессора Dual-core ARM Corte-A9. Данная микросхема способна производить обработку больших объемов данных, например изображений с частотой смены кадров 150 МГц, что является достаточной вычислительной способностью для реализации поставленных к устройству требований [25].

Для выбора отладочной платы необходимо определить количество единичных ПЛИС-элементов, представляющих собой единичную настраиваемую ячейку схемы ПЛИС, настройкой работы и связи между которыми создается программа.

Количество необходимых для реализации программы единичных ПЛИС-элементов образуется: количеством коэффициентов фильтра, необходимым числом блоков для реализации одного коэффициента, равного разрядности вычисляемых переменных, количеством элементов для согласования коэффициентов, как правило, оно принимается от 4 до 8. Также определенное число единичных ПЛИС-элементов необходимо для деления результата на кратность усреднения. По расчетам выявлено, что для реализации алгоритма потребуется 0,128 тыс. единичных ПЛИС-элементов, исходя из этого и необходимости вывода полученных эхограмм (потребности интерфейсов передачи информации) была выбрана отладочная плата из списка, приведенного в таблице.

Таблица 1. Сравнение характеристик отладочных плат ПЛИС

Плата	Процессор (ARM Cortex)	Кол-во единичных ПЛИС, тыс. шт.	ОЗУ DDR3, Гб	Flash, Мб	Наличие модели в VIVADO	Размеры, см	Разрядность Ethernet, Мб	Кол-во USB 2.0	Наличие HDMI	Наличие SPI
ZedBoard	A9	28	1	4	+	10×8	1	2	+	+
PYNQ-Z1	A9	23	0,5	4	–	12×9	0,1	1	+	+
ZYBO-Z7	A9	28	0,5	16	–	10×8	0,1	1	+	+
EBAZ4205	A9	30	0,5	4	+	10×8	0,1	1	–	+
XC7Z020	A9	85	1	16	–	10×8	1	1	–	+
ZC706	A9	115	1	16	–	16×16	1	4	+	+

Из представленных плат выбрана отладочная плата ZedBoard. ввиду наличия достаточного количества памяти для хранения кадра эхограммы длительностью до 0,3 мс при частоте замеров до 100 МГц и разряд-

ности до 12 бит. Также плата ZedBoard имеет процессорную часть с возможностью передавать изображение эхограммы по интерфейсу Ethernet со скоростью до 1 МБ/с, а также интерфейсы передачи данных HDMI и USB 2.0 для возможности последующей модернизации.

Вывод

Для реализации блока математической обработки дефектоскопа ДЭМА, реализующего работу по представленному в статье алгоритму обработки данных, оптимально применить ПЛИС в виде отладочной платы ZedBoard. Заключение об эффективности и быстродействии схемы можно будет дать после сборки и тестирования макетного образца.

Список использованных источников и литературы

1. *Муравьев, В. В.* Связь микроструктуры и скорости распространения поперечных и рэлеевских волн в прутках стали 45 / В. В. Муравьев, А. Ю. Будрин, М. Н. Стриженок // Сварка и диагностика. – 2021. – № 4. – С. 53–56. – DOI 10.52177/2071-5234_2021_04_53. – EDN NHHNPU.
2. *Муравьев, В. В.* Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки / В. В. Муравьев, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 4–10. – DOI 10.22213/2410-9304-2020-4-10. – EDN RFCNYN.
3. *Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей* / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 59–70. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70. – EDN KBBVGW.
4. *Муравьев, В. В.* Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старееющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Л. Владыкин // Дефектоскопия. – 2023. – № 5. – С. 12–20. – DOI 10.31857/S0130308223050020. – EDN YZXLMH.
5. *Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов* / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 16–24. – DOI 10.1134/S0130308219020027. – EDN YYTNIT.
6. *Стрижак, В. А.* Оптимизация параметров намагничивающего устройства электромагнитно-акустического преобразователя для контроля легированных сталей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 81–95. – DOI 10.21122/2220-9506-2023-14-2-81-95. – EDN HVKCS.
7. *К вопросу о повышении эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн* / О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – № 3. – С. 3–13. – DOI 10.31857/S0130308223030016. – EDN OOQZWK.

8. *Муравьева, О. В.* Возможности электромагнитно-акустического метода многократной тени при контроле резьбы насосных штанг / О. В. Муравьева, П. Н. Пушин, К. А. Торхов // Дефектоскопия. – 2023. – № 9. – С. 58–60. – DOI 10.31857/S0130308223090075. – EDN ECRKER.

9. *Муравьева, О. В.* Закономерности фокусировки поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя поперечных волн / О. В. Муравьева, А. Ф. Брестер, А. Л. Владыкин // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 9 (303). – С. 27–41. – DOI 10.14489/td.2023.09.pp.027-041. – EDN OYXSOJ.

10. *Платунов, А. В.* Ультразвуковой контроль поверхности катания железнодорожных вагонных колес и бандажей локомотивов с использованием рэлееских волн / А. В. Платунов, В. В. Муравьев, О. В. Муравьева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 41–48. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48. – EDN EOPVUS.

11. Зеркально-теневой метод ультразвукового контроля осей железнодорожных колесных пар с использованием электромагнитно-акустического способа излучения-приема волн / А. В. Платунов, В. В. Муравьев, О. В. Муравьева [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – № 12. – С. 3–11. – DOI 10.31857/S0130308223120011. – EDN XIVYLI.

12. *Муравьева, О. В.* Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката / О. В. Муравьева, А. Ф. Брестер, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 36–51. – DOI 10.31857/S0130308222080048. – EDN BQEKGO.

13. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлееских волн при контроле труб нефтяного сортамента / О. В. Муравьева, Л. В. Волкова, В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – № 12. – С. 48–57. – DOI 10.31857/S0130308220120052. – EDN IZTFXD.

14. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, А. Ф. Башарова [и др.] // Сталь. – 2020. – № 8. – С. 63–68. – EDN MKTWDN.

15. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2022. – № 4. – С. 14–25. – DOI 10.31857/S0130308222040029. – EDN BLAXOE.

16. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.

17. *Муравьева, О. В.* Распространение нормальных акустических волн в валах центробежных насосов с продольными трещинами осевых отверстий / О. В. Муравьева, П. А. Шихарев, С. А. Мурашов // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, № 1 (307). – С. 14–29. – DOI 10.14489/td.2024.01.pp.014-029. – EDN ANTVLW.

18. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 3–12. – EDN SYRLJF.

19. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1 (59). – С. 52–60. – EDN RTUFSE.

20. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.

21. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 565–571. – DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571. – EDN YTPNDZ.

22. *Муравьев, В. В.* Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 71–75. – EDN WAXWNJ.

23. *Стрижак, В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 5–15. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. – EDN NZFFOP.

24. Влияние способа настройки чувствительности ультразвукового контроля на ее распределение по толщине сварных соединений строительных конструкций / С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков, Е. В. Бояркин [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 81–88. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88. – EDN BCZFAG.

25. *Alsheikhy, A.* Design of embedded vision system based on FPGA-SoC / A. Alsheikhy, Ya. F. Said // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2019. – Vol. 10, no. 10. – Pp. 91-98. – DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0101013.

D. I. Ashikhmin, student

E-mail: 2407daniil@mail.ru,

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Selection of a Hardware Platform for Prototyping a High-Speed Acoustic Flaw Detector of Rods, Implementing the Mirror-Shadow Method Using Multiple Reflections

The article discusses platform options for implementing the digital part of signal registration and processing for the flaw detector DEMA. Based on the performance requirements and the specifics of the program implementation, the FPGA was selected.

Keywords: performance, mirror-shadow method on multiple reflections, scanning, hardware and software package.

УДК 534.6

А. Д. Баранов ^{✉^a}, магистрант
Е. С. Попкова ^{✉^b}, канд. техн. наук, доц.
Я. Староверова, канд. техн. наук, доц.
М. М. Шевелько, канд. техн. наук, доц.

E-mail: ^abaranov01_01@mail.ru, ^bespopkova@etu.ru

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Автоматизированное устройство для измерения параметров пьезопреобразователей

В работе описана функциональная схема автоматизированного устройства измерения параметров электроакустических преобразователей (ЭАП). Представлены результаты расчетов программы, управляющей функционированием устройства, на примере измерений, выполненных на пластине из пьезокерамики ЦТС-19.

Ключевые слова: пьезопреобразователь, идентичность, пьезокерамика, резонансная частота, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика

Введение

Задача измерения параметров пьезоэлектрических электроакустических пьезопреобразователей (ЭАП) является актуальной, поскольку ЭАП получили широкое распространение во многих областях науки и техники, таких как неразрушающий контроль, измерительные тракты различных устройств, гидроакустические комплексы и системы [1]. При этом погрешности в определении значений таких величин, как частота резонанса/антирезонанса и коэффициента связи, могут привести к ошибкам в определении соответствующих этим величинам параметров всей системы, где используются преобразователи. Целью настоящего исследования является разработка автоматизированного устройства, позволяющего определить следующие параметры ЭАП: частоту резонанса (f_p) / антирезонанса (f_a), минимум и максимум модуля входного сопротивления и электрическую емкость C , строить импедансные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ), а также сохранять результаты измерений с целью дальнейшей обработки и подбора максимально идентичных ЭАП. На сего-

дняшний день существуют установки серии «Цензурка», позволяющие измерять параметры ЭАП в автоматическом режиме [2]. В установке реализован спектральный способ измерений, позволяющий возбуждать пьезопреобразователь широкополосным сигналом, спектр которого охватывает заданную область частот [3]. В качестве такого сигнала в аппаратуре используется сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). «Цензурка-ВЧ» позволяет измерять характеристики ЭАП с рабочими частотами до 2 МГц. При этом в таких областях, как неразрушающий контроль и измерительная техника, широко распространены ЭАП с рабочими частотами выше 2 МГц, параметры которых также необходимо определять в автоматическом режиме. В связи с этим разработка устройства для измерения параметров высокочастотных ЭАП является важной и актуальной задачей.

Методы измерения характеристик ЭАП

Известно большое количество методов определения характеристик ЭАП, которые могут быть классифицированы по времени внешнего воздействия [4]:

- статические (время воздействия настолько велико, что длина волны значительно превышает любой из размеров исследуемого материала);
- динамические (длина волны колебаний сравнима с одним из размеров образца).

Разрабатываемое устройство базируется на динамическом методе резонанса-антирезонанса.

Описание экспериментальной установки

Для проведения измерений была разработана соответствующая установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Схема данного устройства основана на схеме прибора для автоматических измерений частот резонанса и антирезонанса амплитудным методом [4]. Управление работой устройства осуществляется с помощью персонального компьютера (ПК) по каналу USB. Диапазон частот устанавливается с помощью ПК, полученные результаты используются для дальнейшего анализа на ПК.

Микроконтроллер (МК) задает код генератору синусоидального сигнала (ГСС), который вырабатывает сигнал заданной частоты. Далее сигнал подается на измеритель АЧХ и ФЧХ (И1) или измеритель электрической емкости (И2). Выбор измерителя осуществляется с помощью переключателя К. Измеритель И1 служит для измерения АЧХ и ФЧХ импеданса в районе частот резонанса и антирезонанса. Измеритель И2 позволяет измерять электрическую емкость ЭАП на низкой частоте

(1 кГц). Снимаемый с измерителя И1 сигнал подается на амплитудный детектор (АД) и фазовый детектор (ФД), после чего поступает на соответствующие входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) МК.

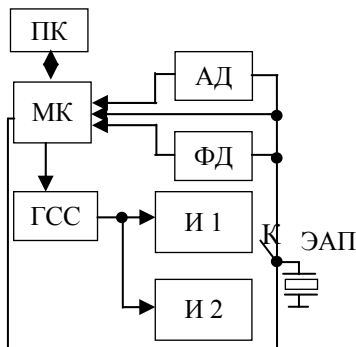


Рис. 1. Функциональная схема разработанного устройства

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 в качестве примера представлен результат расчета АЧХ и ФЧХ импеданса квадратной пьезопластины в программе, управляющей функционированием разработанного устройства. Длина (ширина) l и толщина t пьезопластины представлены в таблице.

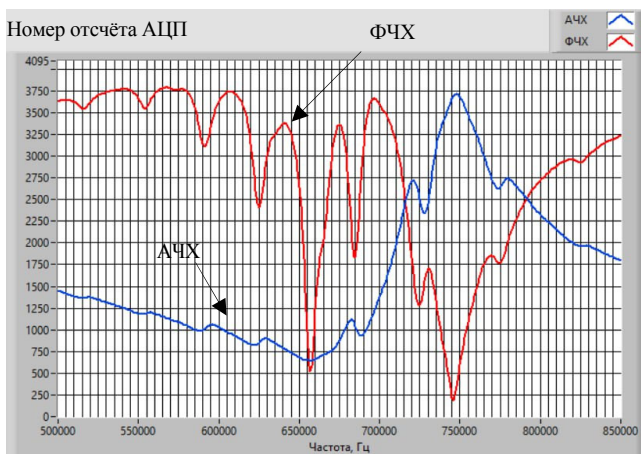


Рис. 2. Импедансные АЧХ и ФЧХ пьезопластины, выполненной из пьезокерамики ЦТС-19

В программе также выполняется расчет электрической емкости C , частоты резонанса f_p и антирезонанса f_a . Полученные данные представлены в таблице.

Результаты измерений

Материал	l , мм	t , мм	C , нФ	f_p , МГц	f_a , МГц
ЦТС-19	38	3	2,4	0,657	0,746

По результатам проведенных исследований, относительная погрешность измерений составляет 0,1 %. Представленные измерения могут быть проведены как для пьезопластин, так и для ЭАП. Результаты измерений серии пьезопластин или ЭАП позволят отобрать идентичные по параметрам изделия для дальнейшего использования в измерительных устройствах различного назначения.

Выводы

Описанное в настоящей работе автоматизированное устройство позволяет определять следующие параметры: частоту резонанса (f_p) / антирезонанса (f_a), минимум и максимум модуля входного сопротивления и электрическую емкость C , строить импедансные АЧХ и ФЧХ, а также сохранять результаты измерений с целью дальнейшей обработки и подбора максимально идентичных пьезопластин и ЭАП на частотах выше 2 МГц. В дальнейшем в реализуемый устройством функционал будет добавлена возможность измерения тангенса угла диэлектрических потерь, после чего планируется регистрация разработки в качестве средства измерения.

Список использованных источников и литературы

1. *Шарапов, В. М.* Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Му-сиенко, Е. В. Шарапова. – Москва : Техносфера, 2006. – 632 с.
2. *Иванов, Н. М.* Цифровая аппаратура и алгоритмы оперативного измерения параметров изделий пьезотехники / Н. М. Иванов, Е. В. Кондаков, Ю. К. Милославский // Известия ТРТУ. – 2005. – № 2 (46). – С. 78–83. – EDN: HVIPRV.
3. *Иванов, Н. М.* Новые средства измерения параметров пьезокерамических элементов и пьезоматериалов / Н. М. Иванов, В. Л. Земляков, Ю. К. Милославский // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 (26). – С. 29–38. – EDN: RZEGBV.
4. Пьезокерамические преобразователи : справочник / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Легуша, Н. И. Прудько, С. И. Пугачев. – Ленинград : Су-достроение, 1984. – 256 с.

A. D. Baranov^{✉ a}, master student

E. S. Popkova^{✉ b}, CSc in engineering, assoc. prof.

Ya. Staroverova, CSc in engineering, assoc. prof.

M. M. Shevelko, CSc in engineering, assoc. prof.

E-mail: ^abaranov01_01@mail.ru, ^bespopkova@etu.ru

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, Russia

Automated Device for Measuring Parameters of Piezoelectric Transducers

The paper describes the functional scheme of an automated device for measuring the parameters of electroacoustic transducers (EAP). The results of calculations of the program controlling the operation of the device are presented using the example of measurements performed on a PZT-19 piezoceramic plate.

Keywords: piezoelectric transducer, identity, piezoceramics, resonant frequency, amplitude-frequency response, phase-frequency response

УДК 620.179.16

К. Ю. Белослудцев, А. Л. Владыкин, аспиранты
А. Б. Ефремов, инженер-программист 1-й категории
А. С. Кузьмин, студент
E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Информативные параметры акустического контроля пружинной проволоки в условиях ее автоматического сканирования*

Представлены результаты исследования информативных параметров акустического контроля пружинной проволоки в условиях ее автоматического сканирования. Контроль реализован с использованием проходного электромагнитно-акустического преобразователя и многократного зеркально-теневоего метода.

Ключевые слова: пружинная проволока, многократный зеркально-теневой метод, электромагнитно-акустический преобразователь, информативные параметры.

Введение

Пружинная проволока находит широкое применение во многих отраслях промышленности для изготовления пружин и других упругих элементов. В процессе производства пружинной проволоки могут возникать внутренние дефекты, такие как пористость, посторонние включения, трещины, волосовины, закаты и другие [1]. Для своевременного обнаружения этих дефектов на стадии производства важно использовать неразрушающий контроль [2–4]. Своевременное выявление дефектов позволяет снизить риск аварий и увеличить срок службы изделий, изготовленных из пружинной проволоки [5].

Перспективным методом решения данной проблемы являются акустические методы контроля, в частности зеркально-теневой метод с использованием электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей [6].

© Белослудцев К. Ю., Владыкин А. Л., Ефремов А. Б., Кузьмин А. С., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Целью работы является изучение влияния автоматического сканирования пружинной проволоки на информативные параметры многократного зеркально-теневого метода контроля.

Материалы и методы

Объект контроля – образец пружинной проволоки, используемой для производства автомобильных пружин из стали 54SiCr6 (ISO 1.7102) диаметром 12 мм с искусственно нанесенными боковыми цилиндрическими сверлениями различного диаметра и глубины с различным расстоянием между дефектами (рис. 1).

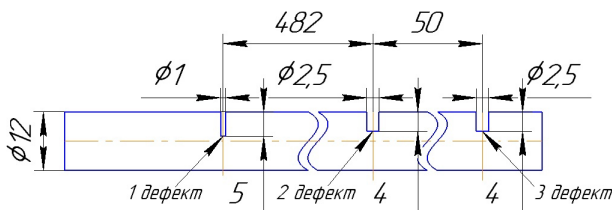


Рис. 1. Эскиз объекта контроля с искусственными дефектами

Многократный зеркально-теновый метод реализован с использованием проходного ЭМА-преобразователя и информационно-измерительной системы ДЭМА-П [7]. Сканирование пружинной проволоки осуществлялось с использованием автоматизированной установки, блок-схема которой представлена на рис. 2. Установка обеспечивает возможность равномерного перемещения проволоки со скоростью от 1 до 9 м/мин.

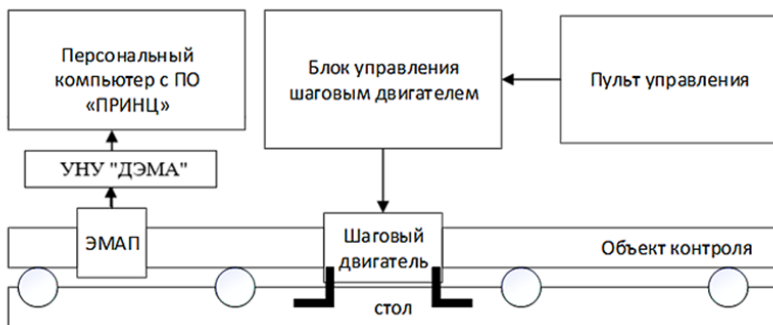


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки контроля и сканирования

Результатом зеркально-теневого метода на многократных отражениях являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца [8, 9]. Наличие дефекта в зоне контроля приводит к ослаблению сигнала многократных отражений, что в свою очередь приводит к изменению статистических информативных параметров (математическое ожидание M_n , дисперсия D_n , среднеквадратическое отклонение σ_n , асимметрия S_n , эксцесс E_n и многократный коэффициент выявляемости K_s), описанных в работе [10]. Для исследований разработано специализированное программное обеспечение, реализующее функцию самописца информативных параметров регистрируемых сигналов в процессе сканирования.

Результаты и обсуждение

Поведение некоторых из исследованных информативных параметров в процессе сканирования образца проволоки на скорости 3 м/мин представлено на рис. 3.

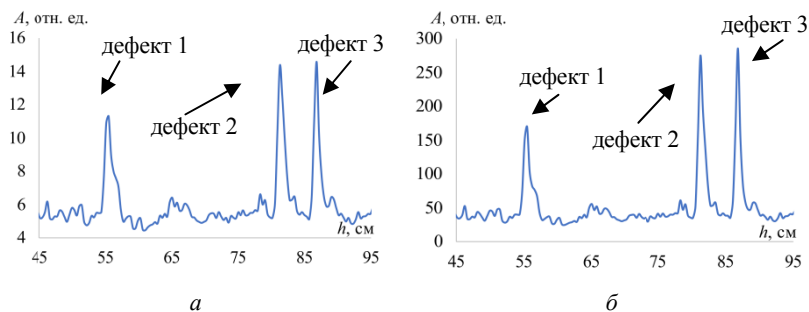


Рис. 3. Изменение информативных параметров во время сканирования: асимметрия (а), эксцесс (б)

Исследования показали, что наиболее чувствительными информативными параметрами являются асимметрия и эксцесс, для которых наблюдается максимальное отношение – сигнал/шум, где сигнал – максимальное значение характеристики в области дефекта, шум – среднее значение характеристики в области вне дефекта (таблица). Наблюдается также закономерная пропорциональная зависимость амплитуды сигнала от размера отражателя (№ 1 – имеет минимальный диаметр).

Отношение сигнал/шум для информативных параметров

№ дефекта	Эквивалентный размер дефекта, мм ²	Асимметрия, дБ	Экссесс, дБ
Дефект 1	5	6,0	9,6
Дефект 2	10	7,4	13,3
Дефект 3	10	7,4	13,5

Выводы

Результаты исследования информативных параметров при контроле пружинной проволоки в процессе сканирования со скоростью 3 м/мин показали целесообразность использования параметров асимметрии и эксцесса, обеспечивающих наибольшее соотношение сигнал/шум, при этом наблюдается прямая пропорциональность амплитуды информативного параметра от эквивалентного размера дефектов (произведение диаметра сверления и его глубины), а также возможность раздельного выявления дефектов на расстоянии 50 мм друг от друга и оценки эквивалентного размера дефектов по амплитуде информативного параметра.

Список использованных источников и литературы

1. Григорьев, В. М. Анализ разрушений пружин пассажирского вагона / В. М. Григорьев, В. М. Макиенко, П. В. Соколов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 1 (2–3). – С. 94–97. – EDN UDYKRZ.
2. Муравьев, В. В. Оценка стабильности технологического процесса по результатам контроля размеров заготовок оружейных стволов / В. В. Муравьев, Т. Р. Вагапов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 53–66. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-3-53-66. – EDN XMNFWZ.
3. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов, К. А. Торхов, П. Н. Пушин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.
4. A high-speed acoustic-emission diagnostic system / A. N. Ser'eznov, V. V. Murav'ev, L. N. Stepanova, S.I. Kabanov, V.L. Kozhemyakin, A.E. El'tsov, E.Yu. Lebedev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1998. – Vol. 34, no. 7. – Pp. 481-485. – EDN LERWAF.
5. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров, В. Б. Харитонов, В. Н. Чаплыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 4. – С. 103–107. – EDN TFIYML.
6. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вест-

ник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.

7. Акустические и электромагнитные свойства заготовок стволов гражданских ружей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Т. Р. Вагапов, В. Е. Макарова, Е. А. Степанова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 59–70. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-1-59-70. – EDN KBBVGW.

8. *Стрижак, В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 5–15. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. – EDN NZFFOP.

9. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 565–571. – DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571. – EDN YTPNDZ.

10. *Муравьева, О. В.* Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката / О. В. Муравьева, А. Ф. Брестер, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 36–51. – DOI 10.31857/S0130308222080048. – EDN BQEKGO.

K. Yu. Belosludtsev, A. L. Vladykin, postgraduates

A. B. Efremov, software engineer of the 1st category

A. S. Kuzmin, student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Informative Parameters of Acoustic Testing of a Spring Wire in Conditions of Its Automatic Scanning

The results of the study of informative parameters of acoustic testing of a spring wire under conditions of its automatic scanning are presented. The testing is implemented using a pass-through electromagnetic-acoustic transducer and a multiple mirror-shadow method.

Keywords: spring wire, multiple mirror-shadow method, electromagnetic-acoustic transducer, informative parameters.

УДК 534.8.081.7*А. В. Блинова*, аспирантE-mail: anna.tarasovaaa@mail.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Оценка влияния растягивающей нагрузки на скорость акустической волны в листах терморасширенного графита *

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния растягивающей нагрузки на скорость моды S_0 волны Лэмба образцов терморасширенного графита, вырезанных вдоль и поперек проката. Определено, что скорость моды S_0 может являться информативным параметром при оценке деформации образцов терморасширенного графита. Также проведен расчет коэффициентов акустоупругости как вдоль, так и поперек проката листов терморасширенного графита.

Ключевые слова: терморасширенный графит, акустическая волна, мода S_0 , скорость, лист, растягивающая нагрузка.

Введение

Метод акустоупругости широко используется для исследования напряженно-деформированного состояния металлов [1, 2]. При исследованиях преимущественно используются объемные волны. Характерной особенностью пористых сред является возможность деформирования в разной степени пор и скелета в процессе напряжения, что может приводить к качественно иным зависимостям акустических свойств материалов от нагрузки. Пористые материалы – это класс функционально-конструкционных материалов с оптимальными показателями физических и механических свойств, благодаря их пористой структуре [3]. Пористые материалы используются в качестве накопителей электроэнергии [4], графитовых прокладок [5], уплотнительного материала [6] и др.

© Блинова А. В., 2025

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Целью работы является оценка влияния статической растягивающей нагрузки на изменение скорости моды S_0 волны Лэмба на примере образцов терморасширенного графита.

Материалы и методы

Нагружение образца терморасширенного графита (ТРГ) с одновременным определением скорости моды S_0 волны Лэмба проводилось с использованием специально разработанной установки, представленной на рис. 1. На установленный в захваты образец закреплены излучатель и приемник моды S_0 волны Лэмба с жестко фиксированной базой. Последовательно к образцу прикладывалась растягивающая нагрузка от 0,2 до 3,2 МПа. Испытаниям подвергались образцы листов ТРГ толщиной 1,52 мм и плотностью 940 кг/м³, вырезанные как вдоль, так и поперек проката.

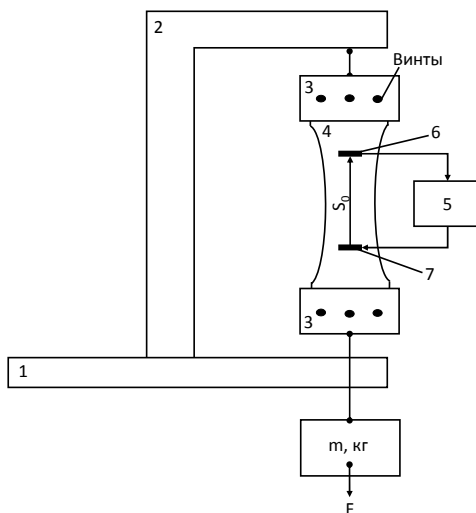


Рис. 1. Установка определения скорости моды S_0 волны Лэмба: 1 – неподвижная опора, 2 – направляющая балка, 3 – захваты, 4 – лист ТРГ, 5 – дефектоскоп DIO-1000LF, 6 – приемник, 7 – излучатель

Скорость распространения моды S_0 волны Лэмба определялась по формуле [7]

$$C_{S0} = \frac{l}{t - t_p}, \quad (1)$$

где l – расстояние, пройденное S_0 -волной, t – время прихода волны, $t_p = 25$ мкс – временная задержка в пьезопреобразователе.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Графики зависимости моды S_0 от растягивающей нагрузки для образцов, вырезанных вдоль и поперек проката, представлены на рис. 2.

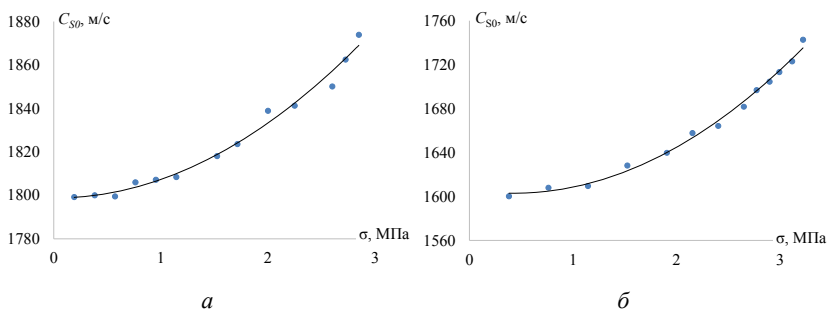


Рис. 2. Графики зависимости скорости моды S_0 волны Лэмба от растягивающей нагрузки для образцов, вырезанных вдоль (а) и поперек проката (б)

Испытание образцов показало, что с увеличением растягивающей нагрузки на образец терморасширенного графита как вдоль проката, так и поперек проката скорость моды S_0 увеличивается. При этом большее изменение скорости моды S_0 наблюдается поперек проката (7,8 %) в отличие от изменения скорости моды S_0 вдоль проката (3,5 %). При этом зависимости носят нелинейный характер. Последнее может быть связано с волноводным эффектом, обусловленным вытянутостью пор в структуре терморасширенного графита, которые имеют различие для образцов, вырезанных вдоль и поперек проката.

С использованием зависимостей, представленных на рис. 2, могут быть рассчитаны коэффициенты акустоупругости [8]:

$$k = \frac{\Delta C/C_0}{\sigma}, \quad (2)$$

где σ – максимальная приложенная нагрузка, МПа; $\Delta C/C_0$ – максимальное относительное изменение скорости.

Оценены коэффициенты акустоупругости, которые составили: для образца ТРГ вдоль проката $0,014 \text{ МПа}^{-1}$, для образца ТРГ поперек проката $0,029 \text{ МПа}^{-1}$, что существенно выше, чем в металлах.

Выводы

Проведено исследование по оценке влияния растягивающей нагрузки образцов терморасширенного графита на скорость моды S_0 волны Лэмба, которая может использоваться в качестве информативного параметра при оценке деформации листов терморасширенного графита. Определено, что большее изменение скорости моды S_0 наблюдается у листа терморасширенного графита, вырезанного поперек проката.

Список использованных источников и литературы

1. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-станговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
2. *Муравьев, В. В.* Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки / В. В. Муравьев, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 4–10. – DOI 10.22213/2410-9304-2020-4-10.
3. *Богдан, О. П.* Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / О. П. Богдан, А. В. Блинова, Л. А. Денисов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 97–105. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105. – EDN HMAOQ.
4. Study of porous carbon materials for supercapacitors / M. V. Popov, A. E. Brestner, S. I. Yusin, A. G. Bannov // Chemistry for Sustainable Development. – 2021. – Vol. 29, no. 6. – Pp. 673–683. – DOI 10.15372/CSD2021348. – EDN FYANKY.
5. Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий / О. Ю. Исаев, Д. В. Смирнов, А. А. Пономарев, А. Л. Каменева, и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 34–42.
6. *Наймушин, А. И.* Способ получения пористого уплотнительного материала для проточного тракта газотурбинного двигателя на основе металлического композиционного материала / А. И. Наймушин, Р. Н. Черепанин, И. Ю. Ефимочкин // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2015. – № 7. – С. 9–15. – EDN RZVOXV.
7. Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита. / О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Л. А. Денисов, О. П. Богдан // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15 (3). – С. 213–220. – DOI 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230.
8. *Муравьев, В. В.* Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старееющего железоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Л. Владыкин // Дефектоскопия. – 2023. – № 5. – С. 12–20. – DOI 10.31857/S0130308223050020. – EDN YZXLNH.

A. V. Blinova, postgraduate

E-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Evaluation of the Effect of Tensile Load on the Acoustic Wave Velocity in Sheets of Thermally Expanded Graphite

This paper presents the results of a study of the effect of a tensile load on the velocity of the S_0 Lamb wave mode of thermally expanded graphite samples cut lengthwise and across rolled products. It is determined that the S_0 mode velocity can be an informative parameter in assessing the deformation of expanded graphite samples. The calculation of the acoustoelastic coupling coefficient have been calculated both along and across rolled sheets of thermally expanded graphite.

Keywords: thermally expanded graphite, acoustic wave, S_0 mode, velocity, sheet, tensile load.

УДК 534.8.081.7

О. П. Богдан , канд. техн. наук, доц.

П. В. Загвозкин, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Исследование влияния внешнего растягивающего напряжения на акустические свойства пенополиэтилена*

В работе представлены результаты исследования влияния внешнего растягивающего напряжения на коэффициент прохождения акустической волны сквозь образец пенополиэтилена и скорость распространения волны Лэмба в образце. Показана возможность оценки коэффициента акустоупругости по коэффициенту прозрачности и скорости распространения волны Лэмба при растяжении образцов максимально выдерживаемой нагрузкой. Получены результаты по ползучести и восстановлению образцов пенополиэтилена при воздействии внешней статической растягивающей нагрузки, приложенной к ним.

Ключевые слова: пенополиэтилен, коэффициент прохождения, акустическая волна, растягивающее напряжение, стержневая волна.

Введение

Пористые материалы находят все более широкое распространение в промышленности, строительстве, медицине и других областях [1]. К таким материалам относится пенополиэтилен (ППЭ), представляющий собой открытую или закрытую ячеистую структуру, полученную путем химического или физического вспенивания, при этом он обладает уникальными свойствами, такими как низкая плотность, высокая тепло- и звукоизоляция, низкое влагопоглощение, хорошая сжимаемость и восстанавливаемость и др. [2, 3]. Применение ППЭ в различных областях промышленности сопровождается воздействием на него различных внешних факторов: давления, влаги, температуры и т. п. [2–6], поэтому

© Богдан О. П., Загвозкин П. В., 2025

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167>, с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

исследование его физических свойств, в том числе и акустических, при данных воздействиях является актуальной задачей.

В работе представлены результаты варьирования акустических свойств ППЭ при воздействии на него внешнего статического растягивающего напряжения, которое может приводить к модификации структуры материала и, как следствие, к изменению способности ППЭ к поглощению акустической волны и ее распространению.

Целью работы является исследование влияния внешнего статического растягивающего напряжения на коэффициент прохождения акустической продольной волны сквозь лист ППЭ и скорости распространения волны Лэмба.

Методы и материалы

Исследование влияния внешнего растягивающего напряжения на акустические свойства ППЭ проводились в двух направлениях:

- исследование на прочность при растяжении;
- исследование на ползучесть и восстанавливаемость.

Измерение коэффициента прохождения акустической волны D сквозь образец ППЭ в процессе его растяжения и до него произведено с использованием бесконтактного акустического теневого амплитудного метода [7, 8], для реализации которого применялась экспериментальная установка (патент № 2796231), входящая в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Измерение скорости распространения волны Лэмба моды S_0 в образце ППЭ в процессе его растяжения и до него, основанное на регистрации времени прохождения волны фиксированного расстояния в образце, произведено с использованием информационно-измерительной системы, собранной на базе низкочастотного акустического дефектоскопа DIO1000 LF [9].

Установка для растяжения образцов в процессе исследования представлена на рис. 1.

Внешнее статическое растягивающее напряжение σ , прикладываемое к образцу, определялось по формуле

$$\sigma = \frac{m \cdot g}{l \cdot h}, \quad (1)$$

где m – масса нагрузки на образец, кг; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $l = 100 \text{ мм}$ – поперечный размер образца в области измерения акустических свойств; h – толщина образца, мм.

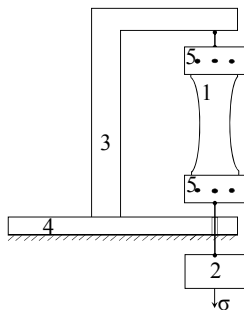


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения испытаний на растяжение образцов ППЭ: 1 – исследуемый образец, 2 – блок, обеспечивающий растягивающее напряжение, 3 – направляющая балка, 4 – неподвижная опора, 5 – зажимные планки

Измерение массы нагрузки на образец m выполнено с помощью весов CAS SW-10W III класса точности, линейных размеров l и h – штангенциркулем ШЦЦ-1-125 0,01 по ГОСТ 166-89.

Погрешность измерения статического растягивающего напряжения:

$$\delta_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{g \cdot \delta_m}{l \cdot h}\right)^2 + \left(\frac{m \cdot g \cdot \delta_l}{l^2 \cdot h}\right)^2 + \left(\frac{m \cdot g \cdot \delta_h}{l \cdot h^2}\right)^2}, \tag{2}$$

где $\delta_{\sigma} = 5 \text{ г}$ – погрешность измерения массы нагрузки на образец; $\delta_l = \delta_h = 0,01 \text{ мм}$ – погрешность измерения линейных размеров образца ППЭ. Погрешность измерения растягивающего напряжения в зависимости от массы нагрузки на образец лежит в диапазоне 0,1–3,6 кПа, что не превышает 1 %.

В качестве материалов для исследования использовались образцы ППЭ марки ISOLON 500 (табл. 1), которые подготавливались в соответствии с типом I по ГОСТ 15873–2017 с обеспечением параллельности их продольной оси направлению ориентации ячеек.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов ППЭ

Образец	Толщина h , мм	Плотность ρ , кг/м ³	Кратность вспенивания
№ 1	$1,12 \pm 0,01$	69 ± 6	15
№ 2	$2,13 \pm 0,02$	37 ± 3	25
№ 3	$5,20 \pm 0,05$	33 ± 7	30

Результаты и их обсуждение

Для каждого образца ППЭ предварительно измерены амплитуда прошедшего сигнала U и коэффициент прохождения D акустической

волны сквозь него (табл. 2), а также время T_0 распространения волны Лэмба моды S_0 и ее скорость C_{S0} (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики исследуемых образцов ППЭ

Образец	Амплитуда прошедшего сигнала U_0 , мВ	Коэффициент прохождения D_0 , %	Время T_0 распространения волны Лэмба моды S_0 , мкс	Скорость C_{S0} волны Лэмба моды S_0 , м/с
№ 1	428 ± 2	$27,4 \pm 0,2$	$146,07 \pm 0,01$	$353,0 \pm 1,2$
№ 2	392 ± 2	$25,1 \pm 0,2$	$162,50 \pm 0,01$	$347,2 \pm 1,2$
№ 3	292 ± 2	$17,7 \pm 0,2$	—	—

Исследование образцов ППЭ на прочность при растяжении

В процессе исследования производилось постепенное растяжение образцов ППЭ за счет увеличения внешней нагрузки с одновременным измерением коэффициента прохождения волны сквозь него (рис. 2) и времени распространения в нем волны Лэмба моды S_0 (рис. 3). Увеличение внешнего растягивающего напряжения σ приводит к увеличению коэффициентов прохождения D для всех образцов (рис. 2, а) за счет уменьшения их толщины. При этом чем больше плотность и меньше коэффициент вспенивания, тем большую растягивающую нагрузку необходимо приложить для разрушения образца и тем меньше изменение коэффициента прозрачности в процессе растяжения при одинаковом значении приложенной нагрузки (рис. 2, б).

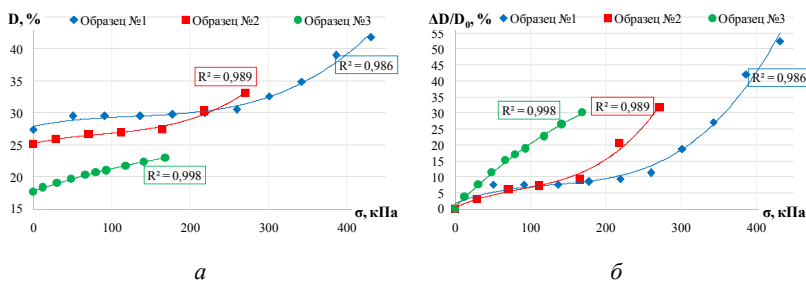


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения D (а) и его изменения $\Delta D/D_0$ в процессе растяжения (б) от растягивающего напряжения σ

При измерении времени распространения волны Лэмба в образцах ППЭ в процессе их растяжения наблюдается уменьшение времени (рис. 3, а) вследствие увеличения скорости волны с ростом нагрузки за счет вытягивания пор в направлении приложенной силы. При этом чем

больше плотность образца и меньше кратность вспенивания, тем менее существенно изменяется скорость волны Лэмба в процессе растяжения при одной и той же приложенной нагрузке (рис. 3, б).

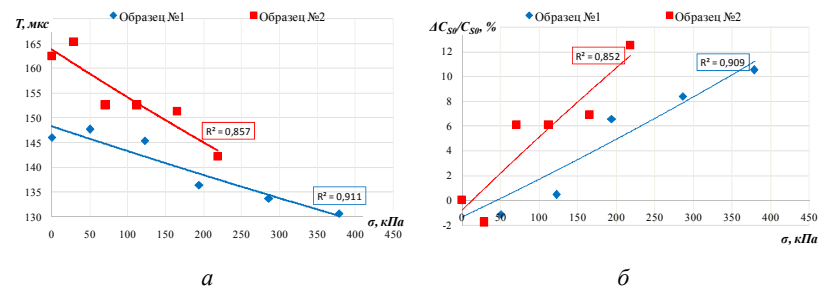


Рис. 3. Зависимость времени распространения волны в образце (а) и изменения скорости волны $S_0 \Delta C_{S0} / C_{S0}$ в процессе растяжения (б) от растягивающего напряжения σ

Используя зависимости на рис. 2, б и 3, б, определены:
– коэффициент акустоупругости по прозрачности K_D :

$$K_D = \frac{\Delta D / D_0}{\sigma_{\max}}, \tag{3}$$

– коэффициент акустоупругости по скорости волны S_0 :

$$K_{C_{S0}} = \frac{\Delta C_{S0} / C_{S0}}{\sigma_{\max}}, \tag{4}$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальная растягивающая нагрузка, не приводящая к разрушению образца, Па; $\Delta D / D_0$ – относительное изменение коэффициента прозрачности в процессе растяжения, $\Delta C_{S0} / C_{S0}$ – относительное изменение скорости волны S_0 в процессе растяжения. Результаты оценки коэффициентов акустоупругости приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов акустоупругости образцов ППЭ

Образец	№ 1	№ 2	№ 3
Коэффициент акустоупругости по прозрачности K_D , 1/МПа	1,21	1,16	1,79
Коэффициент акустоупругости по скорости волны $S_0 K_{C_{S0}}$, 1/МПа	0,28	0,57	–

Исследование образцов ППЭ на ползучесть и восстанавливаемость

Исследования проводилось в следующем порядке:

1. Ползучесть (нагружение): 300 с – воздействие статической растягивающей нагрузкой $\sigma = 0,45\sigma_{\max}$ на образец при измерении акустических свойств с периодичностью 60 с.

2. Восстанавливаемость: 300 с – восстановление свойств образца после снятия статической растягивающей нагрузки σ при измерении акустических свойств с периодичностью 15 с.

Получены зависимости коэффициента прохождения волны сквозь образец ППЭ (рис. 4, образец № 2) и времени распространения волны в образце ППЭ (рис. 5, образец № 2) в процессе растяжения-восстановления, используя которые выполнена оценка степени ползучести $\Delta D_{300}/D_0$ и восстановления $\Delta D_{600}/D_0$ исследуемых образцов (табл. 4).

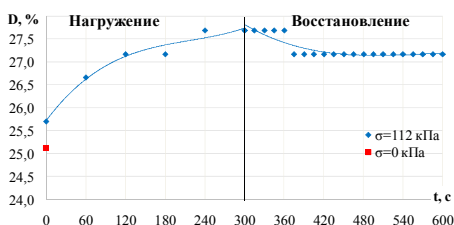


Рис. 4. Изменение коэффициента прохождения волны сквозь образец ППЭ № 2 в процессе растяжения-восстановления

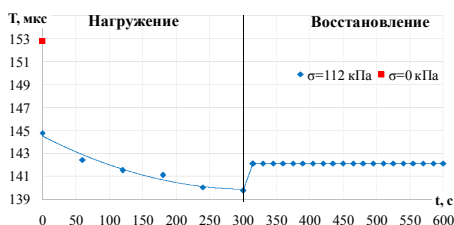


Рис. 5. Изменение времени распространения волны в образце ППЭ № 2 в процессе растяжения-восстановления

Таблица 4. Степень ползучести и восстановления образцов ППЭ по коэффициенту прохождения D

Образец	№ 1	№ 2
Степень ползучести $\Delta D_{300}/D_0$, %	18,0	10,2
Степень восстановления $\Delta D_{600}/D_0$, %	12,0	8,2

Как видно из графика (рис. 4), при приложении фиксированной нагрузки и выдержке под ней в течение 300 с коэффициент прохождения продолжает расти, что свидетельствует об удлинении образца, а следовательно, о его ползучести. Время распространения волны Лэмба (рис. 5) при фиксированном расстоянии между датчиками и при приложении фиксированной нагрузки и выдержке под ней в течение 300 с уменьшается в результате возрастания скорости волны, что также свидетельствует о продолжающемся вытягивании пор и его ползучести. Исследования также показали, что за время восстановления образца, равное времени воздействия нагрузки на него, образец полностью не восстанавливается (рис. 4 и 5).

Выводы

В ходе проведенных исследований влияния внешнего статического растягивающего напряжения на акустические свойства ППЭ получены важные результаты, подтверждающие, что в процессе эксплуатации в условиях внешних механических воздействий акустические характеристики (а следовательно и упругие) данного материала могут существенно меняться в зависимости от степени и времени воздействия.

Также результаты исследований подчеркивают важность учета изменения акустических свойств при использовании ППЭ в акустических приложениях, что открывает новые перспективы для дальнейших исследований в области оптимизации акустических характеристик полимерных пористых материалов.

Список использованных источников и литературы

1. Применение новых пористых материалов для нужд различных отраслей промышленности / Е. Астахов, А. Астахова, П. Царин, И. Колганов, С. Горобец, А. Дымова // *Электроника: Наука, технология, бизнес.* – 2019. – № 8 (189). – С. 130–135.
2. *Бакирова, И. Н. Газонаполненные полимеры : учеб. пособие / И. Н. Бакирова, Л. А. Зенитова.* – Казань : Казан. нац. исследоват. технолог. ун-т, 2009. – 105 с. – ISBN 978-5-7882-0819-0. – EDN ZFZKBN.
3. *Колосова, А. С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия / А. С. Колосова, Е. С. Пикалов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2020. – № 10. – С. 54–67. – EDN JAMYTX.
4. Оценка долговечности вспененных полиолефинов / А. С. Пилипенко, Б. И. Ефимов, В. И. Кращенко, Е. О. Безверхова // *Инновации в жизнь.* – 2020. – № 2 (33). – С. 129–136. – EDN CIIHSV.

5. *Motta, P. H.* Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber / P. H. Motta, C. M. Roland, R. D. Corsaro // Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – No. 4 (111). – Pp. 1782–1790.
6. *Дементьев, А. Г.* Деформирование химически сшитого пенополиэтилена / А. Г. Дементьев, Г. Н. Матюхина, А. В. Панкратов // Пластические массы. – 2013. – № 4. – С. 8–12.
7. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом / О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2023. – № 8. – С. 21–31.
8. *Богдан, О. П.* Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / О. П. Богдан, А. В. Блинова, Л. А. Денисов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 97–105. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105.
9. Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита / О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Л. А. Денисов, О. П. Богдан // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 213–230.

O. P. Bogdan , CSc in engineering, assoc. prof.

P. V. Zagvozhkin, student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Investigation of the Effect of External Tensile Mechanical Stress on the Acoustic Properties of Polyethylene Foam

The paper presents the results of a study of the effect of external tensile stress on the coefficient of passage of an acoustic wave through a styrofoam sample and the propagation velocity of the Lamb wave in the sample. It is shown that it is possible to estimate the acoustoelasticity coefficient by the transparency coefficient and the Lamb wave propagation velocity when stretching samples with a maximum sustained load. There sults on creep and recovery of Styrofoam samples under the influence of an external static tensile load applied to them were obtained.

Keywords: polyethylene foam, transmission coefficient, acoustic wave, tensile stress, rod wave.

УДК 620.179.16

М. С. Вечёра^{1, ✉}, аспирант
*С. И. Коновалов*¹, д-р техн. наук, проф.
Р. С. Коновалов^{1, 2}, канд. техн. наук, доц.
*В. М. Цаплев*¹, д-р техн. наук, проф.
E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

Исследование влияния формы демпфера на эффективность работы ультразвукового преобразователя

Изучено влияние формы демпфера пьезоэлектрического ультразвукового преобразователя на эффективность его работы. Рассмотрен случай, при котором демпфер выполнен в виде усеченного конуса с некоторым наклоном образующей. В работе представлен ряд результатов численного моделирования и натурного эксперимента. Проведено исследование влияния формы тыльной части демпфера на эффективность его работы.

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, пьезоэлектрический преобразователь, демпфер, пьезопластина, моделирование.

Введение

При всем разнообразии объектов, методов и средств акустического неразрушающего контроля неотъемлемой его частью являются специальные конструктивные элементы, предназначенные для излучения и приёма звуковых волн. В настоящее время наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), активным элементом которых, как правило, является пьезокерамика. Нередко ее тыльная сторона сопряжена с демпфером. Его свойства определяют многие характеристики преобразователя, которые могут иметь непосредственное влияние на результаты контроля. Наиболее часто на практике используется механическое демпфирование. Авторами настоящей работы был проведен анализ научно-технической литературы [1–3], который показал отсутствие системной информации о влиянии геометрической формы демпфера на его эффективность. Основные усилия авторов предшествующих публикаций были направлены на технологию из-

готовления и состав демпфера, а не на исследование влияния его формы на эффективность ПЭП. С целью восполнения указанного пробела в настоящей работе рассмотрен демпфер в виде усеченного конуса.

Постановка задачи

На рис. 1 показана схема, поясняющая постановку задачи, где 1 – пьезопластина, 2 – демпфер, 3 – ось симметрии. Параметр α на данном рисунке обозначает угол наклона образующей, d – толщина пьезопластины. Очевидным является то, что эффективность такого демпфера будет зависеть от величины угла α и от формы его тыльной стороны. Задача состоит в определении оптимального значения параметра α , а также в поиске оптимальной формы тыльной стороны демпфера. При этом под оптимальными параметрами понимаются такие их значения, при которых достигается минимум сигнала, поступающего на пьезопластину 1 в результате многократных переотражений внутри демпфера.

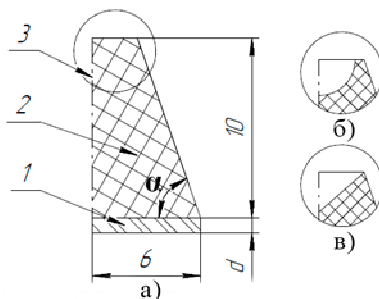


Рис. 1. Схема задачи: демпфер с плоской тыльной частью (а); полусферическая выборка (б); конусная выборка (в)

Описание эксперимента

Поставленная задача решалась в два этапа: теоретически, путем моделирования в программе COMSOL, и натурным моделированием. При проведении экспериментов в качестве активного элемента использовалась пьезокерамика марки ЦТС-19. Демпфер представлял собой смесь эпоксидной смолы КДА, отвердителя ЭТАЛ-45М и мелкодисперсного порошка вольфрама ПВ-1 в массовом соотношении 0,5:0,5:1.

Первый этап эксперимента сводился к построению осесимметричной геометрии решаемой задачи и моделированию процесса переотражения волн в демпфере методом конечных элементов с использованием различных модулей, доступных в COMSOL версии 6.1. Для корректных

расчетов сетка модели была построена в соответствии с критерием Кунта – Фридрихса – Леви [4].

Натурный эксперимент представлял собой изготовление и изучение образцов пьезопластин с демпфером различной формы. Требуемая форма получалась путем заливки дегазированной демпфирующей массы в водорастворимую оснастку. При этом была использована технология 3D-печати. По описанной технологии было изготовлено 30 образцов с применением пьезопластин с частотой 2,5 МГц.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость выходного напряжения на пьезоэлементе при различных углах α .

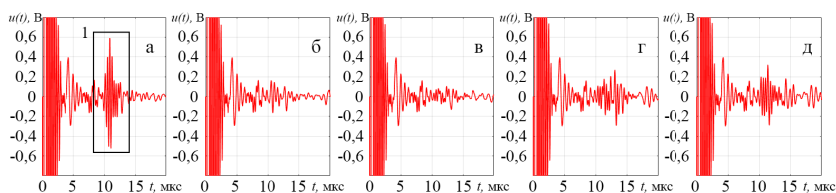


Рис. 2. Выходное напряжение на пьезоэлементе на частоте возбуждения 2,5 МГц при углах наклона α , равных: 60° (а), 62° (б), 64° (в), 66° (г), 68° (д)

Моделирование методом конечных элементов показало, что оптимальный угол наклона образующей α находится в диапазоне 64°...66°. Сигнал, обозначенный цифрой 1, является следствием многократных переотражений внутри демпфера. При этом дальнейшее уменьшение угла α приводит к росту амплитуды паразитного сигнала. Это можно объяснить тем, что ультразвуковые волны испытывают отражения в сторону активного элемента не только от тыльной части, но и от боковых стенок демпфера.

В качестве критерия оценки эффективности демпфера при натурном моделировании использовались данные о длительности акустического зондирующего импульса, измерение которого проводилось по реверберационно-шумовой характеристике (РШХ) каждого из образцов. РШХ были получены при помощи специального программного обеспечения UdProbe. При этом длительность фиксировалась на уровнях -45 и -75 дБ. При исследованиях пластина с одной стороны была нагружена на демпфер, а с другой – на воздух. Подробно процесс получения результатов описан в [5, 6].

Так, например, длительности на уровнях -45 и -75 дБ для образца с наклоном стенок 90° равны $T_{-45}^{90^\circ} = 13$ мкс и $T_{-75}^{90^\circ} = 33$ мкс соответственно. Аналогично для образца с наклоном стенок 65° длительности составляют $T_{-45}^{65^\circ} = 8$ мкс и $T_{-75}^{65^\circ} = 16$ мкс. Таким образом, при изменении угла наклона образующей конуса демпфера на 25° длительность зондирующего импульса на двух уровнях уменьшилась практически в 2 раза. Зависимость длительности зондирующего сигнала от угла α приведена на рис. 3.

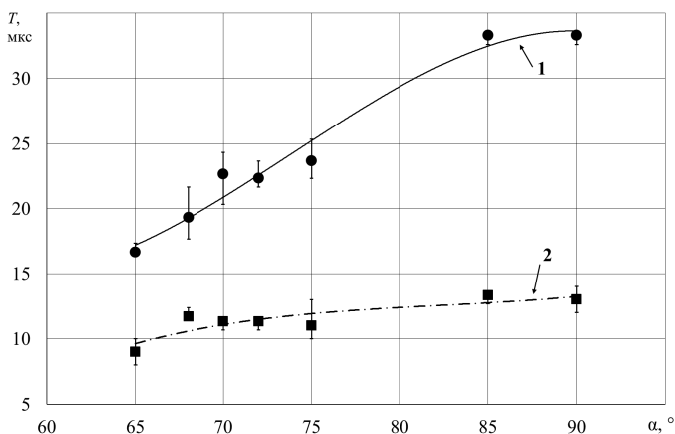


Рис. 3. Зависимость длительности зондирующего импульса от α :
1 – кривая для случая измерения по уровню -75 дБ; 2 – по уровню -45 дБ

Для изучения влияния формы тыльной стороны демпфера на эффективность его работы были смоделированы случаи, при которых на тыльной стороне выполнены углубления в виде конуса и полусферы различного размера. Для сравнения на рис. 4 приведены зависимости выходного напряжения на пьезопластине, нагруженной на демпфер с различной формой тыльной части.

На рис. 4, б показана зависимость при углублении в виде конуса, радиус основания которого равен радиусу тыльной части демпфера, а угол наклона образующей равен 50° . Рис. 4, в является результатом моделирования полусферической выборки, радиус которой равен 0,9 мм. Можно видеть, что применение тыльной части демпфера сложной формы не

ведет к улучшению его характеристик при значительном усложнении технологии изготовления такого демпфера.

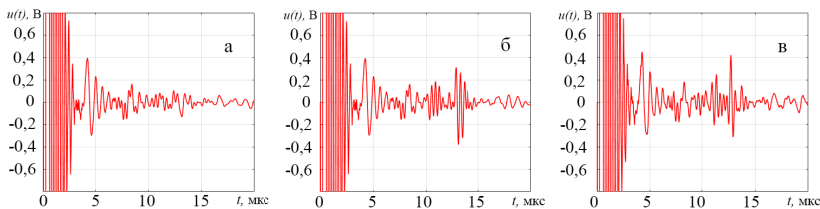


Рис. 4. Выходное напряжение на пьезоэлементе при различных формах тыльной стороны демпфера: плоскость (а), конус (б), полусфера (в)

Выводы

Проведены исследования, позволившие установить, что оптимальный угол наклона образующей конусного демпфера находится в диапазоне $\alpha = 64^\circ \dots 66^\circ$. Изучено влияние некоторых возможных форм тыльной части демпфера на амплитуду паразитных сигналов. Достигнуто снижение длительности реверберационных шумов, что имеет важное значение при конструировании пьезопреобразователей.

Список использованных источников и литературы

1. *Uchino, K.* Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology. – 2nd ed. – Woodhead Publishing, 2017. – 830 p.
2. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 280 с.
3. *Домаркас, В. И.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В. И. Домаркас, Р.-И. Ю. Кажис. – Вильнюс : Минтис, 1974. – 256 с.
4. *Courant, R.* Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik / R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy // Mathematische Annalen. – 1928. – Vol. 100. – S. 32–74.
5. Assessment of the influence of the geometrical shape of the damper on the efficiency of an ultrasonic operation piezoelectric transducer / M. S. Vechera, S. I. Kononov, R. S. Kononov, B. I. V. M. Tsaplev, A. D. Soloveva, J. Lee // Sensors. – 2023. – № 23 (24). – Art. no. 9662. – DOI: [10.3390/s23249662](https://doi.org/10.3390/s23249662).
6. *Вечёра, М. С.* К вопросу о рациональном выборе формы демпфера ультразвукового пьезопреобразователя / М. С. Вечёра, С. И. Коновалов, И.В. Чх., В. М. Цаплев // Дефектоскопия – 2024. – № 4. – С. 3–15.

M. S. Vechera^{1, ✉}, postgraduate

*S. I. Konovalov*¹, DSc in engineering, prof.

R. S. Konovalov^{1, 2}, CSc in engineering, assoc. prof.

*V. M. Tsaplev*¹, DSc in engineering, prof.

E-mail: vechiora.mihail@yandex.ru

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,
Saint-Petersburg, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
Saint-Petersburg, Russia

Study of the Influence of the Damper Shape on the Efficiency of the Ultrasonic Transducer

The influence of the shape of the damper of a piezoelectric ultrasonic transducer on the efficiency of its operation has been studied. The case in which the damper is made in the form of a truncated cone with a certain slope of the generatrix is considered. The paper presents a number of results of numerical modeling and field experiment. The influence of the shape of the rear part of the damper on the efficiency of its operation has been studied.

Keywords: acoustic non-destructive testing, piezoelectric transducer, damper, piezo plate, modeling

УДК 620.179.16

*А. Л. Владыкин*¹, аспирант
В. В. Муравьев^{1,2}, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой
E-mail: pmkk@mail.ru

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Удмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Оценка акустических свойств в дисперсионно-твердеющей стали, изготовленной методом аддитивной технологии^{*}

В работе представлены результаты измерения скорости акустических волн в образце, изготовленном селективным лазерным спеканием. Показано, как скорость распространения продольной и поперечной волн изменяется по длине образца.

Ключевые слова: аддитивные технологии, структуроскопия, электромагнитно-акустический преобразователь, скорость волны.

Введение

Одним из перспективных направлений изготовления металлических конструкций являются аддитивные технологии, которые с каждым годом становятся более совершенными и доступными [1]. Основные преимущества аддитивных технологий заключаются в том, что они позволяют получать детали практически идеальной формы за меньшее время по сравнению с традиционными производственными процессами [2].

Из-за колебаний ряда факторов, таких как химический состав порошка, условия обработки, размер зерен порошка и т. д., могут снижаться механические свойства легированных сталей, изготовленных с помощью технологий аддитивного производства, что существенно ухудшает их долговечность и конструктивную прочность [3, 4].

© Владыкин А. Л., Муравьев В. В., 2025

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Перспективным методом решения данной проблемы являются акустические методы контроля с использованием электромагнитно-акустических преобразователей [5] и гибких пьезопреобразователей на основе ПВДФ-пленки [6]. Целью данной работы является оценка скоростей объемных волн в образце аддитивного производства для определения упругих свойств и анизотропии.

Методы и материалы

Измерения скорости акустических волн проведены в стали марки 17-4 PH, изготовленной по технологии селективного лазерного сплавления на принтере EOSINT 280M фирмы EOS GmbH. Исследуемый образец выполнен в виде призмы с квадратным основанием 15×15 мм и высотой 150 мм, совпадающей с направлением роста порошка, без термической обработки. Химический состав стали: Cr 15–17 %, Ni 3–5 %, Cu 3–5 %, C < 0,07 % и др.

Измерения проводились с помощью структуроскопа (СЭМА) с использованием бесконтактного электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП), который генерирует две поперечные волны с взаимно перпендикулярной поляризацией. Возбуждение и прием продольной волны осуществлялся с помощью пьезопреобразователя на основе гибкой пьезопленки ПВДФ и ультразвукового дефектоскопа DIO-1000 PA.

В ходе эксперимента получена серия многократных эхоимпульсов объемных волн от двух плоскопараллельных граней образца и переотражений по толщине образца с шагом через каждые 10 мм (рис. 1).

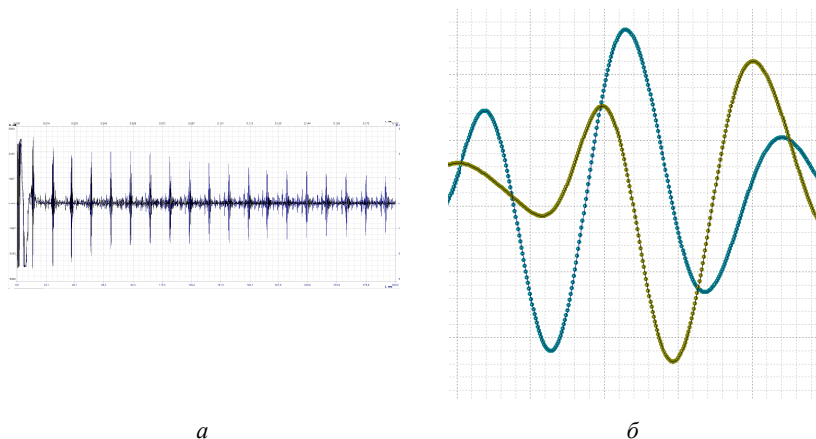


Рис. 1. Осциллограмма многократных отражений поперечной волны (а) и разность времени прихода между 2 ортогонально поляризованными волнами (б)

Скорость ультразвуковых волн рассчитана в соответствии с уравнением (1), учитывающим многократное отражение волны от противоположных граней [7, 8]:

$$C_{t,l} = \frac{2 \cdot h \cdot n}{\Delta \tau_{t,l}}, \quad (1)$$

где $C_{t,l}$ – скорость поперечной (t) и продольной (l) волны соответственно, м/с; h – толщина образца, м; n – количество анализируемых отражений; $\Delta \tau_{t,l}$ – время между отражениями поперечной (t) и продольной (l) волнами соответственно, с.

Результаты и их обсуждение

В результате анализа распределения скоростей продольной и поперечной волн по длине образца (рис. 2) обнаружено, что скорости объемных волн изменяются по длине образца в пределах от 6 до 10 м/с.

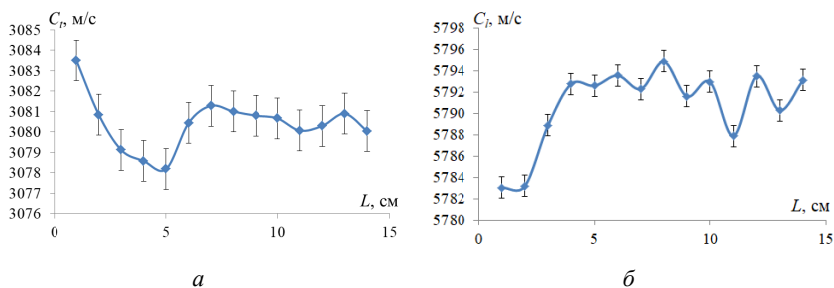


Рис. 2. График распределения скорости поперечной (а) и продольной (б) волны по длине образца

Разность скорости поперечной волны в направлении роста частиц относительно скорости волны в направлении хода луча составила 20 м/с, а для продольной волны – 40 м/с, что указывает на существенную анизотропию образца.

Выводы

Исследованы акустические свойства образца аддитивного производства, изготовленного из стали 17-4 РН. Использование поперечных и продольных волн позволяет определить анизотропию свойств в деталях аддитивного производства для выявления неоднородности акустических свойств.

Изменения скорости продольной волны в двух взаимно-перпендикулярных направлениях составила 0,69 %, а для поперечной волны – 0,65 %

Список литературы

1. Characterization of Microstructural and Mechanical Properties of 17-4 PH Stainless Steel by Cold Rolled and Machining vs. DMLS Additive Manufacturing / P. Moreno-Garibaldi, M. Alvarez-Vera, J.A. Beltrán-Fernández et al. // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8. – P. 48. – DOI 10.3390/jmmp8020048
2. Influence of aging treatments on 17–4 PH stainless steel parts realized using material extrusion additive manufacturing technologies / A. Pellegrini, F. Lavecchia, M.G. Guerra et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 126. – Pp. 163–178. – DOI 10.1007/s00170-023-11136-3
3. Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на структуру и физико-механические свойства заготовки из нержавеющей хромоникелевой стали / А. А. Хлыбов, Д. А. Рябов, А. А. Соловьев, А. А. Шуянова, А. В. Лукоянов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 33–41. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-4-33-41. – EDN CXEZPE.
4. Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, Д. А. Рябов, М. С. Аносов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 18–26. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26. – EDN QKYSZD.
5. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
6. *Муравьев, В. В.* Акустические и электромагнитные свойства мартенситно-старяющего железохромоникелевого сплава с добавлением меди при механическом растяжении / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Л. Владыкин // Дефектоскопия. – 2023. – № 5. – С. 12–20. – DOI 10.31857/S0130308223050020. – EDN YZXLMH.
7. *Муравьева, О. В.* Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11. – EDN WYCBJV.
8. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов, К. А. Торхов, П. Н. Пушин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.

*A. L. Vladikin*¹, postgraduate

V. V. Murav'ev^{1,2}, DSc in engineering, prof., head of department

E-mail: pmkk@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Izhevsk, Russia

Evaluation of Acoustic Properties in Dispersion-Hardening Steel Made by Additive Manufacturing

The paper presents the results of measuring the velocity of acoustic waves in a sample produced by selective laser sintering. It is shown how the velocity of propagation of longitudinal and transversal waves varies along the length of the sample.

Keywords: additive manufacturing, structroscopy, electromagnetic acoustic transducer, wave velocity.

УДК 620.179.16

Л. В. Волкова ✉, канд. техн. наук, доц.*А. А. Кондаков*, студент*Д. А. Петров*, аспирантE-mail: ludmila396@rambler.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Исследование акустической анизотропии плашек буровых ключей в процессе нагружения и напайки*

В статье представлены результаты исследования акустической анизотропии в процессе пайки зубьев в плашках буровых ключей посредством оценки изменения скорости головной и рэлеевской волн при изменении направления сканирования пьезоэлектрическими преобразователями. В роли объекта выступили плашки буровых ключей. Исследовались различные частотные диапазоны для поиска максимальной чувствительности к анизотропному состоянию. Выявлено, что для возбуждения головной волны наиболее чувствительным оказался преобразователь на частоте 9,0 МГц. Для возбуждения рэлеевской волны наиболее чувствительным стал преобразователь с частотой $f = 4,0$ МГц.

Ключевые слова: плашки буровых ключей, головная волна, волна Рэлея, анизотропия.

Введение

Накопление внутренних напряжений в процессе производства изделий приводит к их деформации и разрушению в процессе длительной эксплуатации. Исследование этих напряжений поможет предсказать остаточный ресурс изделия, а также наиболее вероятные повреждения [1]. Различают математические методы, экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы оценки остаточных напряжений [2]. Для оценки остаточного ресурса наиболее перспективным методом является расчетно-экспериментальный метод, но для реализации метода необходимо разработать методики экспериментальных исследований. Одним из перспективных методов является акустическая анизотропия,

© Волкова Л. В., Кондаков А. А., Петров Д. А., 2025

* Работа выполнена при поддержке проекта № ИНМ/983/2024 от 16.04.2024 г. «Разработка методических рекомендаций для акустического контроля качества деталей нефтедобывающего оборудования».

которая в дальнейшем может быть одним из показателей оценки напряженного состояния металла и оценки остаточного ресурса.

В данном исследовании использован метод акустоупругости, основанный на измерении скорости распространения взаимно ортогональных волн в твердом теле [2–5]. Данный метод подробно исследован в [6], разработаны различные методы оценки скоростей ультразвуковых волн, в том числе рэлеевских, и оценки акустической анизотропии [7–9].

Для исследования выбраны головная [10] и рэлеевская волны, чувствительные к напряженному состоянию и структуре металла.

Целью работы являлось изучить изменение скоростей ультразвуковых волн и анизотропии в плашках буровых ключей от направления проката под механическим воздействием, а также под действием температурного воздействия в процессе напайки твердосплавной пластины.

Описание эксперимента

Для проведения исследования изготовлены пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с различной толщиной пьезоэлемента. Блок-схема используемой установки представлена ниже (рис. 1). Изменение толщины данного элемента позволяет получить различные рабочие частоты. С помощью разных пьезоэлектрических преобразователей в объекте контроля возбуждались головная и рэлеевская волны. Рабочие частоты ПЭП представлены ниже (таблица).

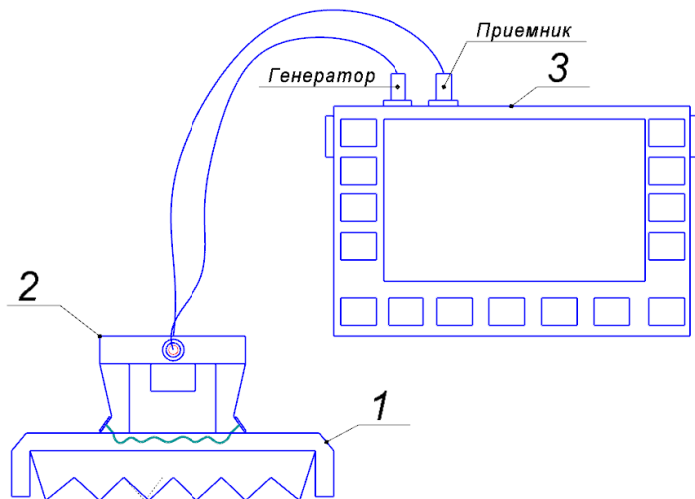


Рис. 1. Схема установки: 1 – объект контроля; 2 – ПЭП; 3 – DIO1000-PA

Рабочие частоты преобразователей

Параметры	Рабочая частота f , МГц			
№ ПЭП	1	2	3	4
Головная волна	3,6	2,7	4,7	9,0
Волна Рэлея	4,0	2,7	5,8	3,7

Были произведены измерения скоростей волн в плашке до напайки твердосплавной пластины и после.

Высокочастотный дефектоскоп DIO1000-PA позволил регистрировать принятые сигналы с частотой дискретизации 200 МГц, что обеспечивает точность в измерении времени 5 нс.

Для механического воздействия использовалось испытательное оборудование компании «Instron». Данное оборудование создано для проведения высокопроизводительных тестов на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. У него есть два испытательных пространства и общая основа.

В ходе проведения измерений были проконтролированы две плашки «Сухарь АКБ-3М2.У21» под воздействием сжимающих напряжений и две плашки под температурным воздействием.

Результаты и их обсуждение

ПЭП поворачивался с шагом в 45° для измерения скорости волны. Оценка акустической анизотропии осуществлялась по формуле

$$a = \frac{C_{90} - C_0}{(C_{90} + C_0)/2}, \quad (1)$$

где C_0 – скорость волны по оси плашки; C_{90} – скорость волны в направлении 90° относительно оси плашки.

Результаты акустической анизотропии для плашек до и после процесса пайки представлены на рис. 2, подложки № 7 и № 8 соответствуют плашкам до напайки, а плашки № 7 и № 8 – после напайки твердосплавной пластины на подложку с использованием меднопоршкового припоя.

По гистограммам видно, что акустическая анизотропия уменьшается после напайки твердосплавной пластины при измерении с использованием как головной, так и рэлееской волн.

Результаты измерения скорости волн в плашках в процессе нагружения сжатием представлены на рис. 3.

По графикам видно, что с увеличением нагружения скорость головной волны увеличивается, тогда, как скорость волны Рэлея изменяется незначительно либо не изменяется совсем.

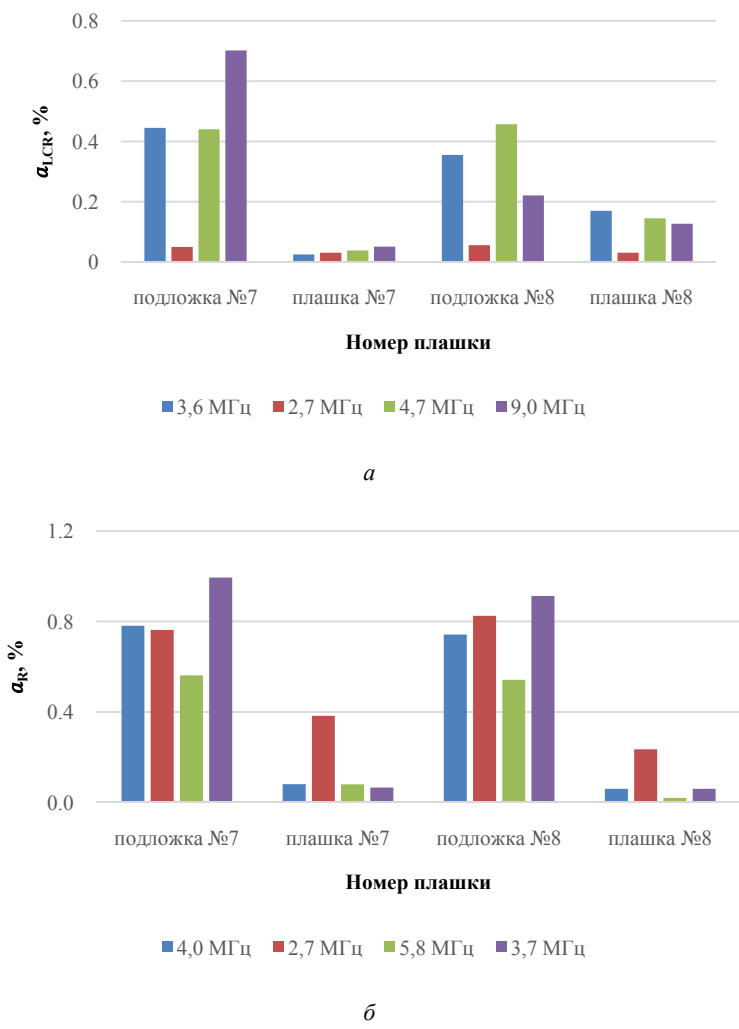


Рис. 2. Гистограммы акустической анизотропии плашек до и после процесса пайки для головной волны (а) и волны Рэлея (б)

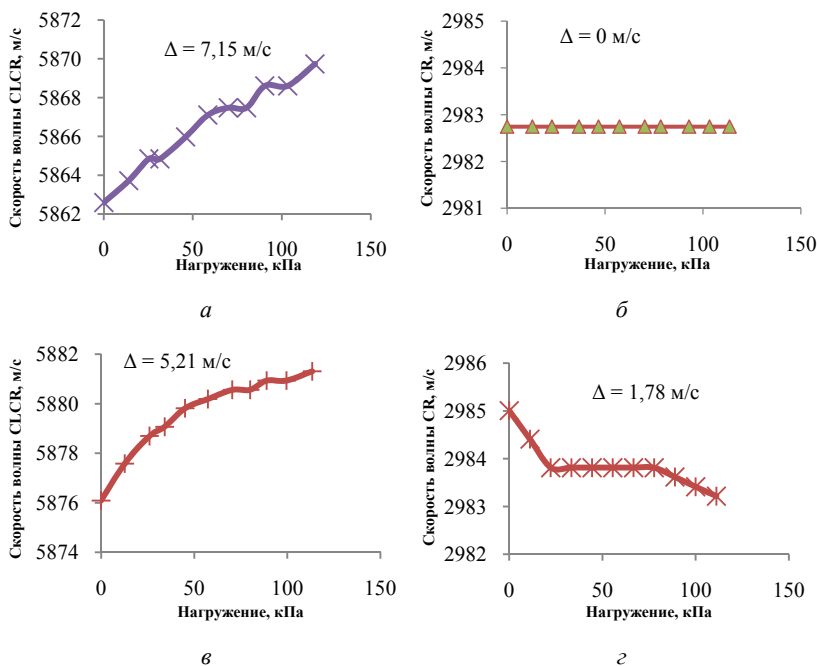


Рис. 3. Диаграммы скорости головной и рэлеевской волн в процессе нагружения объекта: а, в – скорость головной волны в плашках № 7 и № 9 соответственно; б, г – скорость рэлеевской волны в плашках № 7 и № 9 соответственно

Выводы

Таким образом, в процессе данного исследования были рассчитаны скорости волн и коэффициент анизотропии. Выявлено, что в процессе пайки анизотропия существенно снижается, что, в свою очередь, говорит об уменьшении напряжений в объекте. Результаты исследования изменения скорости волн в процессе нагружения говорят о том, что головная волна наиболее чувствительна к анизотропии, нежели волна Рэлея.

Список использованных источников и литературы

1. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров, В.Б. Харитонов, В.Н. Чаплыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 4. – С. 103–107. – EDN TFIYML.

2. Прилуцкий, М. А. Методы определения напряженно-деформированного состояния сварных металлоконструкций / М. А. Прилуцкий // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – № 4 – С. 45–54.

3. Муравьев, В. В. Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах / В. В. Муравьев, А. В. Якимов, С. В. Казанцев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2019. – Т. 16, № 3 – С. 370–376.

4. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.

5. Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, Д. А. Рябов, М. С. Аносов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 18–26. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26. – EDN QKYSZD.

6. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, А. В. Платунов [и др.] // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42–45. – EDN RRVVQR.

7. Выявляемость дефектов муфт насосно-компрессорных труб магнитным, вихретоковым и ультразвуковым многократно-теневым методами контроля / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Синцов, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2022. – № 4. – С. 14–25. – DOI 10.31857/S0130308222040029. – EDN BLAXOE.

8. Чувствительность электромагнитно-акустического метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле труб нефтяного сортамента / О. В. Муравьева, Л. В. Волкова, В. В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – № 12. – С. 48–57. – DOI 10.31857/S0130308220120052. – EDN IZTFXD.

9. Муравьева, О. В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11. – EDN WYCBJV.

10. Разыграев, Н. П. Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // Дефектоскопия. – 2020. – № 9. – С. 3–19.

L. V. Volkova , CSc in engineering, assoc. prof.

A. A. Kondakov, student

D. A. Petrov, postgraduate

E-mail: ludmila396@rambler.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Investigation of Acoustic Anisotropy of Drilling Wrench Dies during Loading and Soldering

The article presents the results of a study of acoustic anisotropy in the process of soldering teeth in the dies of drilling wrenches, by estimating changes in the velocity of the head and Rayleigh waves when the direction of scanning by piezoelectric transducers is changed. The object was the dies of the drilling wrenches. Various frequency ranges were studied to find the maximum sensitivity to the anisotropic state. It was revealed that the transducer at a frequency of 9.0 MHz was the most sensitive for excitation of the head wave. A transducer with a frequency of $f = 4.0$ MHz has become the most sensitive for the excitation of the Rayleigh wave.

Keywords: drilling wrench dies, head wave, Rayleigh wave, anisotropy

УДК 620.179.16

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.

А. Н. Марьин ✉, магистрант

E-mail: mmlexa@bk.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Оценка акустической анизотропии магистрального газопровода при испытании на изгиб*

В обеспечении стабильной и безопасной работы газопроводов возникает необходимость систематического анализа и оценки их состояния. При безопасной эксплуатации магистральных газопроводов важным условием является использование неразрушающих методов контроля, что способствует оперативной диагностике материала труб. При различных нагрузках, испытываемых магистральными газопроводами, изменяются свойства материала труб, что важно при проведении измерений для оценки их состояния.

В данной работе представлены исследования акустической анизотропии магистрального газопровода с использованием структуроскопа электромагнитно-акустического (СЭМА). Метод неразрушающего контроля основан на измерении временных интервалов эхо-сигналов, возникающих при прохождении поперечных волн через материал. Объектом исследования стал участок газопровода диаметром 1420 мм с двумя сварными соединениями. Методы оценки анизотропии включают анализ данных, полученных до и после изгиба трубы. Результаты показали, что коэффициент анизотропии незначительно изменяется при изгибе, а в зоне сварки зафиксированы увеличенные значения, что указывает на изменения в структуре металла.

Ключевые слова: магистральный газопровод, напряженно-деформированное состояние, акустическая анизотропия, акустопругость, поперечные волны.

Введение

В обеспечении стабильной и безопасной работы газопроводов возникает необходимость систематического анализа и оценки их состояния. При безопасной эксплуатации магистральных газопроводов важ-

© Волкова Л. В., Марьин А. Н., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

ным условием является использование неразрушающих методов контроля, что способствует оперативной диагностике материала труб.

Особое внимание уделяется анизотропии материалов, из которых изготовлены газопроводы, поскольку она может существенно влиять на их механические характеристики [1]. В контексте магистральных газопроводов акустическая анизотропия может быть важным аспектом, который влияет на распространение звука в системе трубопроводов. Под влиянием анизотропии материалов звуковые волны в различных направлениях могут распространяться с разной скоростью, влиять на затухание звуковых волн, а значит и происходит потеря их энергии. Анизотропия может возникнуть из-за неоднородности материалов труб, их структуры или напряженно-деформированного состояния [2].

При проведении диагностики труб важно оперативно оценить состояние магистральных газопроводов. Создание искусственных нагрузок при проведении испытаний изделий позволяет исследовать изменения параметров структуры и НДС материала трубопровода, что дает возможность определить их поведение при эксплуатации труб в рабочей среде [3, 4].

Цель работы – разработка методики оценки акустической анизотропии свойств материала магистрального газопровода, основанного на основе акустоупругости двух поперечных волн ортогональных горизонтальных поляризации и прибора для их реализации.

Оборудование

Для исследований использовался структуроскоп электромагнитно-акустический (СЭМА), разработанный специалистами кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». Прибор реализует эхо-импульсный метод неразрушающего контроля, который позволяет измерять временные интервалы амплитуд эхо-сигналов, отраженных от противоположной стенки контролируемого изделия [5]. Настройка и работа структуроскопа осуществляется под управлением специализированного ПО «ПРИНЦ». Излучение и прием двух поперечных волн ортогональных горизонтальных поляризации осуществлялся электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП).

В качестве объекта исследований использовался участок магистрального газопровода диаметром 1420 мм, толщиной стенки 15,7 мм, с двумя продольными сварными соединениями, изготовленный из стали 09Г2С.

Измерения проводились в трех сечениях по длине – середина (3800 мм) и два равноудаленных от нее участка, 2800 и 4800 мм (рис. 1).

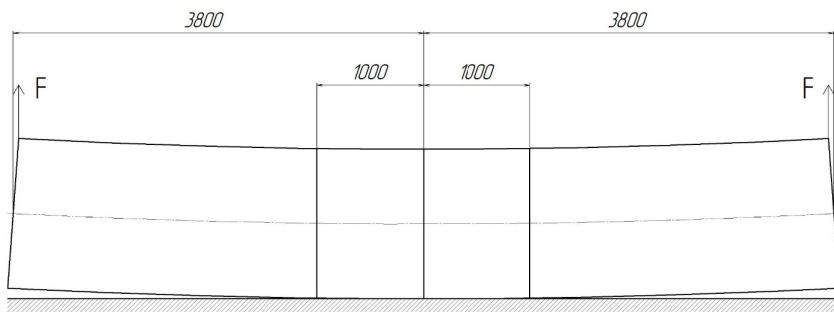


Рис. 1. Схема измеряемых сечений трубы

В каждом сечении преобразователь устанавливается в восьми равноудаленных друг от друга зонах по окружности сечения вдоль длины газопровода. Для удобного описания координат положения ЭМАП по окружности сечения было использовано часовое деление на зоны, изображенное на рис. 2.

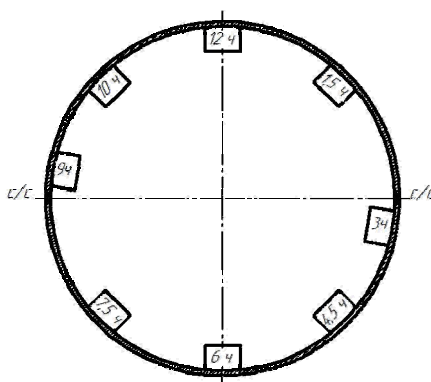


Рис. 2. Схема расположения ЭМАП по сечениям трубы

Изгиб производился с использованием станка трубогибного ГТ1425, предназначенного для холодной гибки в полевых условиях стальных прямошовных и бесшовных труб, до общего искривления трубы в 1,4 градуса.

Методика оценки акустической анизотропии

По зарегистрированным эхограммам определяют время прихода волн по разнице времени между двумя донными сигналами (рис. 3).

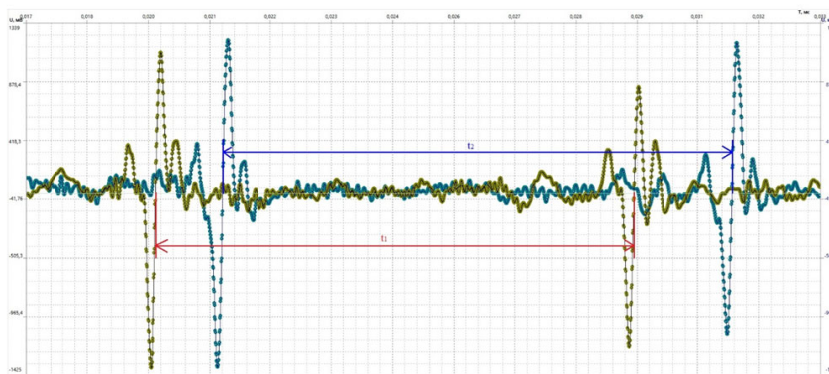


Рис. 3. Определение времени прихода двух поперечных волн в ПО «ПРИНЦ»

Методика вычисления акустической анизотропии основывается на методе акустоупругости, основанном на зависимости скоростей распространения ультразвуковых волн от механических напряжений. Скорости двух поперечных волн ортогональных горизонтальных поляризации и акустическая анизотропия определяются согласно формуле:

$$a = \frac{2 \times (t_2 - t_1)}{t_1 + t_2} \times 100 \%,$$

где a – акустическая анизотропия; t_1 – время прихода поперечной волны, поляризованной вдоль образующей газопровода; t_2 – время прихода поперечной волны, поляризованной вдоль окружности газопровода.

Результаты и их обсуждение

Результаты акустической анизотропии для газопровода до проведения испытания и при максимальном изгибе в 1,4 градуса представлены на рис. 4–6.

Полученные значения коэффициента анизотропии с увеличением изгиба изменялись незначительно: значения колеблются в пределах от 5 до 6 %, кроме максимальных значений 6,5–8 %, которые находятся на 3 и 9 часах, обозначенных как сварные соединения.



Рис. 4. Значения анизотропии относительно изгиба на расстоянии 2800 мм от торца



Рис. 5. Значения анизотропии относительно изгиба на расстоянии 3800 мм от торца

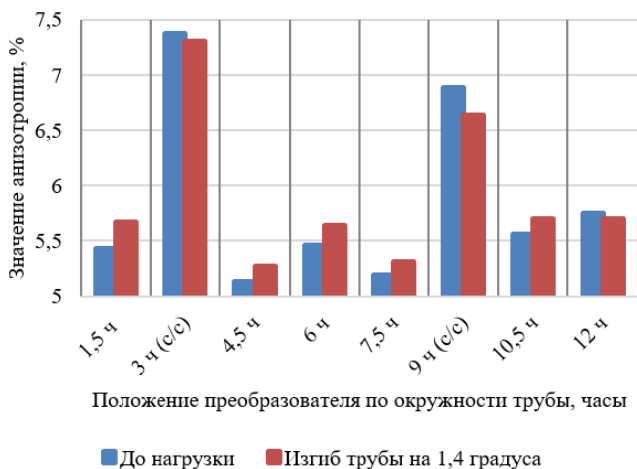


Рис. 6. Значения анизотропии относительно изгиба на расстоянии 4800 мм от торца

Заключение

Разработана методика измерения акустической анизотропии материала магистрального газопровода при проведении испытания на изгиб, основанная на методе акустоупругости двух поперечных волн ортогональных горизонтальных поляризации. Установлено, что в зоне сварного соединения наблюдается увеличенное значение коэффициента анизотропии, что связано с изменением структуры металла в процессе сварки. В процессе исследований на изгиб коэффициент акустической анизотропии при нагрузках не изменяется, что демонстрирует отсутствие возникновения опасных механических нагрузок для эксплуатации магистрального газопровода.

Список использованных источников и литературы

1. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 42–52.
2. Курашкин, К. В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале / Курашкин К. В. // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 3. – С. 382–388.
3. Беляев, А. К. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии / А. К. Беляев,

В. А. Полянский, Д. А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2020. – № 4. – С. 130–151.

4. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – № 27 (2). – С. 87–96. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2024-2-87-96>.

5. *Муравьев, В. В.* К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1 (17). – С. 197–205.

L. V. Volkova, CSc in engineering, assoc. prof.

A. N. Marin ✉, master student

E-mail: mmlexa@bk.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Evaluation of Acoustic Anisotropy of the Main Gas Pipeline during the Bending Test

In order to ensure stable and safe operation of gas pipelines, there is a need for systematic analysis and assessment of their condition. In the safe operation of main gas pipelines, an important condition is the use of non-destructive testing methods, which contributes to the prompt diagnosis of pipe material. At different loads experienced by the main gas pipelines, the properties of the pipe material change, which is important when carrying out measurements to assess their condition.

This paper presents studies of the acoustic anisotropy of the main gas pipeline using an electromagnetic acoustic structroscope (SEMA). The method of non-destructive testing is based on measuring the time intervals of echo signals that occur when transversal waves pass through the material. The object of the study was a section of a gas pipeline with a diameter of 1,420 mm with two welded joints. Methods for estimating anisotropy include analyzing data obtained before and after bending the pipe. The results showed that the anisotropy coefficient changes slightly during bending, and increased values are recorded in the welding zone, indicating changes in the metal structure.

Keywords: main gas pipeline, stress-strain state, acoustic anisotropy, acoustoelasticity, transversal waves.

УДК 620.179.14

Н. В. Гордеев ^{✉^a}, инж.-исслед.
А. Н. Сташков ^{✉^b}, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.
А. М. Матосян, инж.-исслед.
И. В. Вшивцев, глав. спец.
E-mail: ^a Gordeev.Nikita@urfu.me, ^b stashkov@imp.uran.ru
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия

Микроконтроллерный дифференциальный магнитный структуроскоп для фазового анализа конструкционных сталей*

Разработан микроконтроллерный дифференциальный магнитный структуроскоп ДМС-5 для неразрушающего контроля фазового состава конструкционных сталей. Методом конечных элементов проведено моделирование и оптимизация конструкции первичного преобразователя структуроскопа, применена температурная компенсация показаний для повышения достоверности контроля.

Ключевые слова: магнитный контроль, фазовый анализ, температурная компенсация, автоматизация, микроконтроллер.

Введение

Важной задачей является контроль фазового состава, который влияет на механические свойства стальных деталей. В связи с этим было разработано множество как разрушающих, так и неразрушающих методов контроля. Среди различных методов неразрушающего контроля хорошо зарекомендовали себя магнитные методы благодаря своей простоте и применимости на практике. В ИФМ УрО РАН в конце 50-х годов прошлого века были разработаны методика и прибор ДМС для определения остаточного аустенита в шарикоподшипниковой стали ШХ15 [1, 2]. Позднее методика была адаптирована для контроля количества остаточного аустенита в мартенситно-старееющей коррозионно-стойкой стали [3, 4]. Однако разработанные и внедренные на предприятиях приборы серии ДМС имели недостатки, такие как зависимость показаний от температуры чувствительного элемента, неинформативная индикация результатов измерения, невозможность накопления и передачи данных.

© Гордеев Н. В., Сташков А. Н., Матосян А. М., Вшивцев И. В., 2025

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

Целью настоящей работы является разработка дифференциального магнитного структуроскопа на основе современной электронной базы для неразрушающего контроля фазового состава, а также исследование температурной зависимости датчика и разработка метода температурной компенсации для повышения достоверности контроля.

Фазовый магнитный анализ

В качестве параметра контроля в фазовом магнитном анализе зачастую используется намагниченность насыщения M_s . В простом случае помимо ферромагнитного мартенсита в сталях может присутствовать парамагнитный остаточный аустенит. Намагниченности этих фаз кардинально различаются.

Одним из методов фазового магнитного анализа является дифференциальный, в котором сравниваются намагниченности насыщения исследуемого образца и эталона с известным фазовым составом. В этом методе в качестве намагничивающих устройств применяются электромагниты с Н-образным ярмом. У такого ярма 2 пары полюсов. Обмотки электромагнита подключены так, что создаваемые ими потоки в центре ярма (перемычке) направлены встречно. В случае если на полюсах находятся одинаковые образцы, магнитные потоки в перемычке полностью компенсируют друг друга и индикатор покажет ноль. В случае разных образцов произойдет раскомпенсация системы. В качестве индикатора применяются феррозонды или датчики Холла.

В работах [5, 6] показано, что напряжённость магнитного поля, измеряемая датчиком Холла, пропорциональна магнитному потоку в данной перемычке:

$$H \sim \frac{B}{\mu_0} \sim \frac{\Phi}{S \cdot \mu_0}, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция в магнитопроводе; μ_0 – магнитная постоянная; Φ – магнитный поток в полюсе электромагнита; S – площадь поперечного сечения магнитопровода вблизи перемычки.

Также следует отметить, что в данном случае напряженность магнитного поля пропорциональна не только магнитному потоку, но и разности намагниченности насыщения контролируемого и эталонного образцов. Именно на этом принципе базируется метод магнитного фазового анализа данного метода.

Моделирование и разработка первичного преобразователя

При моделировании первичного преобразователя дифференциального магнитного структуроскопа для фазового магнитного контроля оста-

точного аустенита использовался прикладной пакет на основе метода конечных элементов.

На рис. 1 показано пространственное распределение магнитной индукции (*а*), а также график магнитной индукции вдоль перемычки ярма (*б*).

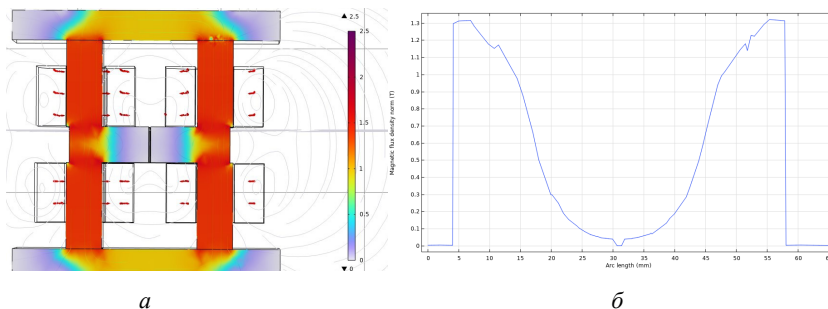


Рис. 1. Пространственное распределение магнитной индукции в первичном преобразователе (*а*) и распределение магнитной индукции вдоль перемычки ярма (*б*)

Из топографии магнитной индукции в случае полной симметрии ярма при идентичных контролируемом и эталоном образцах видно, что магнитная индукция в центре перемычки плавно стремится к нулю.

Микроконтроллерный структуроскоп ДМС-5

Перед проектированием электронной схемы дифференциального магнитного структуроскопа был проведен анализ требований к устройству и определены основные функциональные блоки.

В новой конструкции для регистрации магнитных потоков используются датчик Холла ИМ102А1-1 (ООО «Вега – Флекс»), установленный в перемычке Н-образного ярма. Для усиления сигнала применён дифференциальный усилитель AD623, а фильтр Баттерворта второго порядка снижает помехи. Для температурной компенсации установлен датчик DS18B20, измеряющий температуру ярма, что повысило стабильность измерений.

Микроконтроллер SEEDUINO XIAO стал центральным элементом управления устройством. Он отвечает за сбор, обработку, хранение и вывод данных на индикатор.

Для исследования температурной зависимости на полюса Н-образного электромагнита устанавливались два идентичных образца. При максимальном токе в катушках измерялся сигнал датчика Холла, который оцифровывался и передавался на запись через Bluetooth. Измерения

проводились в семи сериях, охватывающих температурный диапазон от 20 до 45 °С.

На рис. 2 представлен график зависимости сигнала ДМС от температуры. Количество измерений в циклах варьируется от 77 и до 204.

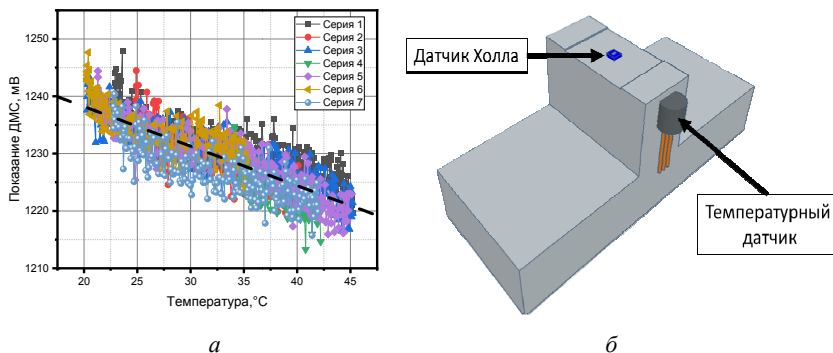


Рис. 2. Зависимости сигнала структуроскопа ДМС от температуры (а); часть магнитопровода первичного преобразователя с датчиком Холла (б)

На графике зависимости сигнала ДМС от температуры (рис. 2, а) в каждой серии данных наблюдаются два участка с разным наклоном: на начальном этапе резкие изменения вызваны разницей в температуре между ярмом и датчиком Холла, так как температурный датчик расположен на расстоянии от датчика Холла (рис. 2, б). После нескольких десятков измерений (около 20) система стабилизируется, и точки выстраиваются на одной линии, указывая на тепловое равновесие и предсказуемую линейную зависимость, которую можно описать уравнением:

$$U = 1252 - 0,69 \cdot T, \quad (2)$$

где U – сигнал датчика Холла; T – температура, измеренная температурным датчиком.

Для компенсации температурных изменений предложен программный метод. Он включает этап прогрева катушек на протяжении 40 секунд для стабилизации температуры, затем проводятся измерения с учётом текущих данных с датчика температуры. Программный метод температурной компенсации позволил существенно стабилизировать показания в диапазоне от 20 °С до 46 °С.

Внешний вид готового микроконтроллерного дифференциального магнитного структуроскопа представлен на рис. 3.

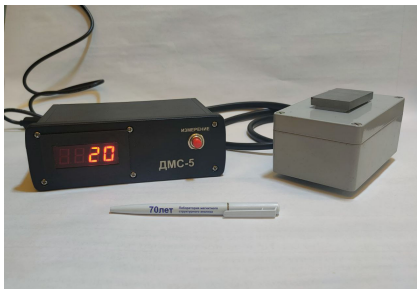


Рис. 3. Внешний вид ДМС-5

Выводы

Разработан микроконтроллерный дифференциальный магнитный структуроскоп ДМС-5 для неразрушающего контроля фазового состава конструкционных сталей. Методом конечных элементов проведены моделирование и оптимизация конструкции первичного преобразователя структуроскопа, применена температурная компенсация показаний для повышения достоверности контроля. Прибор прошел лабораторные испытания.

Список использованных источников и литературы

1. Магнитный контроль качества закалки и отпуска деталей шариковых и роликовых подшипников / М. Н. Михеев, Г. С. Томилов, М. Ф. Помухин, К. Г. Рзянкин, В. А. Уткина // Заводская лаборатория. – 1956. – Т. 22, № 5. – С. 549–555.
2. Михеев, М. Н. Дифференциальный магнитный прибор для контроля качества термической обработки / М. Н. Михеев, Г. В. Сурин, Г. С. Томилов // Заводская лаборатория. – 1960. – Т. 26, № 11. – С. 1306–1308.
3. Магнитные свойства и твердость мартенситно-старееющей стали 08X15H5Д2Т и неразрушающий контроль остаточного аустенита в деталях / Г. В. Бида, Е. Ю. Сажина, А. П. Ничипурук, Т. П. Царькова // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 1–18. – EDN JSBDUX.
4. Bida, G. V. Differential magnetic method of nondestructive testing and phase analysis / G. V. Bida // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2002. – Vol. 38, no. 1. – Pp. 21–35. – DOI 10.1023/A:1020188000822. – EDN LHHAYF.
5. Костин, В. Н. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M / В. Н. Костин, О. Н. Василенко, А. В. Бызов // Дефектоскопия. – 2018. – № 9. – С. 47–53. – DOI 10.1134/S0130308218090051. – EDN YLCDGH.
6. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии / В. Н. Костин, А. А. Осинцев, А. Н. Сташков [и др.] // Дефектоскопия. – 2008. – № 4. – С. 66–77. – EDN JSBEBB.

N. V. Gordeev ^a, research engineer

A. N. Stashkov ^b, CSc in engineering, leading researcher

A. M. Matosyan, research engineer

I. V. Vshivtsev, Senior Specialist

E-mail: ^a Gordeev.Nikita@urfu.me, ^b stashkov@imp.uran.ru

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Microcontroller Differential Magnetic Structuroscope for Phase Analysis of Structural Steels

A DMS-5 microcontroller differential magnetic structroscope has been developed for non-destructive testing of the phase composition of structural steels. The finite element method was used to model and optimize the design of the primary transducer of the structroscope, and temperature compensation of readings was applied to increase the reliability of testing.

Keywords: magnetic testing, phase analysis, temperature compensation, automation, microcontroller.

УДК 620.179.161

Л. А. Денисов¹, К. Ю. Белослудцев¹, аспиранты
О. В. Муравьева^{1, 2, ✉}, д-р техн. наук, проф.

E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова,

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Ижевск, Россия

Влияние температурного воздействия при прохождении акустической волны через пористые среды*

Пористые листовые материалы представляют большой интерес с точки зрения акустической дефектоскопии и структуроскопии. Проблемой широкого применения акустических методов контроля пористых листов являются сложные для математического описания зависимости акустических параметров от параметров среды. В работе представлены результаты исследования влияния температуры листов терморасширенного графита (ТРГ), пенополиэтилена (ППЭ) и окружающей среды на значение коэффициента прозрачности при проведении измерений амплитудно-теневым методом акустического контроля. Выполнено сравнение полученных значений коэффициента прохождения с моделью изменения акустических импедансов. На основании полученных значений выявлено дополнительное влияние температурно-зависимого коэффициента затухания на коэффициент прохождения.

Ключевые слова: пористые среды, амплитудно-теневой метод, температурное воздействие, коэффициент прохождения.

Введение

Пористые материалы находят всё более широкое применение в различных областях промышленности. Одной из важнейших физических характеристик пористых материалов на основе пенополиолефинов (ППЭ) является низкий коэффициент теплопроводности (0,04 Вт/м·К), что позволяет использовать их в качестве теплоизоляторов и сохранять

© Денисов Л. А., Белослудцев К. Ю., Муравьева О. В., 2025

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

эластичность в условиях отрицательных температур [1]. Пористые среды на основе терморасширенного графита (ТРГ), несмотря на сниженный в сравнении с чистым графитом коэффициент теплопроводности [2], обеспечивают возможность работы в широком диапазоне температур при сохранении упругости материала в условиях эксплуатации [3]. Одним из методов структуроскопии таких материалов является бесконтактный амплитудно-теневой метод акустического контроля [4–8], эффективно используемый при оценке неравномерности распределения плотности по площади пористого материала. При этом открытым остается вопрос о влиянии температурного фактора, с одной стороны, как мешающего при разработке методик акустического контроля. С другой стороны, исследование температурных зависимостей акустических характеристик пористой среды можно рассматривать как новое физическое свойство материала.

Целью работы является изучение влияния температурного воздействия на регистрируемый амплитудно-теневым методом коэффициент прохождения листов из пористых материалов.

Материалы и методы

Исследованы следующие объекты: образец ТРГ толщиной 1,52 мм, плотностью 940 кг/м³; образец ППЭ марки «ISOLON 500 1503 AVO» толщиной 3 мм, плотностью 30 кг/м³, размерами 100x100 мм.

Амплитудно-теневой метод реализован с использованием экспериментальной установки контроля пористых сред, входящей в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий». Блок-схема установки представлена на рис. 1.

Исследования проведены в диапазоне температур объекта контроля от 0 до 60 °С с одновременным измерением коэффициента прохождения в отсутствие объекта и с объектом при одинаковых температурах. Низкий диапазон обеспечивался размещением установки для измерений и объекта в морозильную камеру, высокий диапазон – установкой в сушильный шкаф с регулируемой температурой. Температура образца и окружающей среды регистрировалась при помощи цифрового термометра с выносным шупом, установленным в боковое отверстие объекта глубиной 10 мм. Ввиду быстрого теплообмена с окружающей средой измерения проводились с шагом 10 °С. Результатом амплитудно-теневого метода является температурная зависимость коэффициента прохождения $D(t_i)$, рассчитываемая по следующей формуле:

$$D(t_i) = \frac{U_0(t_i)}{U(t_i)} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $U_0(t_i)$ – амплитуда прошедшего сигнала в отсутствие образца; $U(t_i)$ – амплитуда сигнала, прошедшего через образец при температуре t_i .

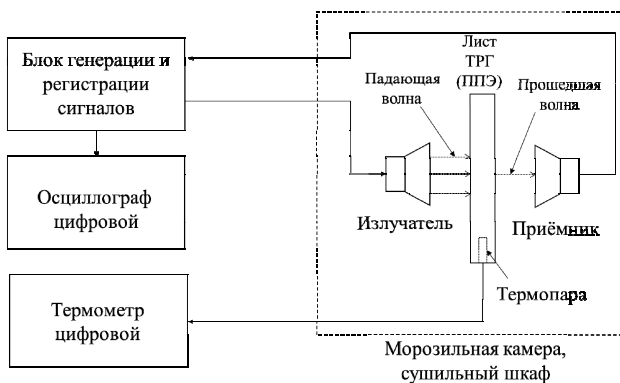


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки измерения коэффициента прохождения

Для отстройки влияния температуры на чувствительность преобразователей и свойств окружающей среды проведены измерения амплитуды $U_0(t_i)$ прошедшего сигнала в отсутствие образца во всем диапазоне температур.

Результаты и обсуждение

Зависимости влияния температуры образцов ТРГ и ППЭ на коэффициент прохождения акустической волны приведены на рис. 2.

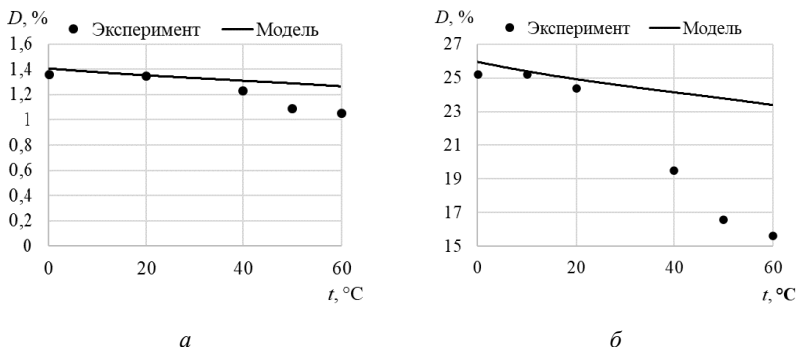


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента прохождения для образца ТРГ (а), для образца ППЭ (б)

Установлено, что коэффициент прохождения акустической волны через газонаполненные среды в низкочастотном диапазоне в общем случае определяется в основном плотностью и толщиной образца и в меньшей степени скоростью звука в нем, а также акустическими свойствами окружающей его среды. Сравнительный анализ коэффициентов прохождения листов ТРГ и ППЭ показывает существенные различия, обусловленные лучшим согласованием по акустическим сопротивлениям материала ППЭ с воздухом.

Известно, что плотность и скорость воздуха чувствительны к изменению температуры и относительной влажности, что напрямую связано с акустическим импедансом среды и, как следствие, ведёт к изменению согласования границ раздела сред воздух – объект контроля – воздух. Высокая скорость изменения температуры в процессе эксперимента позволяет ввести упрощение неизменности абсолютного количества влаги в воздухе. На основании приведенного допущения рассчитаны скорость и плотность воздушной среды с использованием эмпирической зависимости [9], представленные в таблице.

Характеристики воздушной среды и объекта контроля в зависимости от температуры

Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость звука в воздухе, м/с	Плотность воздуха, кг/м³	Плотность ТРГ, кг/м³	Плотность ППЭ, кг/м³
0	100	331,8	1,29	940	30
10	100	338,1	1,24	940	30
20	80	344,4	1,19	940	30
30	50	350,3	1,16	940	30
40	30	356,1	1,12	940	30
50	20	361,8	1,08	940	30
60	10	367,0	1,05	940	30

С использованием данных таблицы получены теоретические значения коэффициента прохождения при изменении температуры с использованием теории тонких пленок (обозначены сплошными линиями на рис. 2). Кривые получены на основании предположения неизменности плотности скелета (табл.) и толщины объекта. Полагаем, что температурное расширение объекта не влияет на толщину образца ввиду малости значений (коэффициент линейного теплового расширения $12 \cdot 10^{-6}$ 1/К для ППЭ, $27 \cdot 10^{-6}$ 1/К для ТРГ).

Рассогласование теоретических кривых с экспериментальными говорит о дополнительном влиянии на процесс прохождения акустической волны затухания в объекте контроля (затухание в воздухе на частотах

килогерцового диапазона стремится к нулю). Сложное влияние температуры на коэффициент затухания может быть объяснено механизмом Френкеля – Био, основанным на эффекте вязкого трения флюидов (заполняющих поры) о твердые стенки скелета.

Выводы

Результаты исследования влияния температурного воздействия на коэффициент прохождения для пористых материалов на примере листов ППЭ и ТРГ свидетельствуют о дополнительном влиянии температурно-зависимого коэффициента затухания. Исследованные зависимости могут быть использованы для отстройки от влияния температуры при реализации методик акустической структуроскопии, а также для анализа влияния температуры на акустические свойства пористых сред.

Список использованных источников и литературы

1. *Almanza, O.* Measurement of the thermal diffusivity and specific heat capacity of polyethylene foams using the transient plane source technique / *O. Almanza, M. A. Rodríguez-Pérez, J. A. De Saja* // *Polymer International*. – 2004. – Vol. 53, no. 12. – Pp. 2038-2044. – DOI 10.1002/pi.1624.
2. A review of the coefficient of thermal expansion and thermal conductivity of graphite / *L. Zhao et al.* // *New Carbon Materials*. – 2022. – Vol. 37, no. 3. – Pp. 544-555.
3. Теплофизические свойства терморасширенного графита / *С. Н. Каллаев, А. Г. Бакмаев, А. А. Бабаев, А. Р. Билалов, З. М. Омаров, Е. И. Теруков* // *Теплофизика высоких температур*. – 2022. – Т. 60, № 1. – С. 19–22. – EDN: DNXCTL. – DOI: 10.31857/S0040364422010161.
4. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / *О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. С. Рысев* // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 61–68. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68. – EDN RNJUOD.
5. Evaluation of Nonuniformity of Elastic Properties of Sheets Made from Closed-Cell Polyolefin Foams by Acoustic Method / *O. P. Bogdan, D. V. Zlobin, O. V. Murav'eva* [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*. – 2021. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 58-66. – DOI 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66. – EDN AKZRSP.
6. Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита. / *О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Л. А. Денисов, О. П. Богдан* // *Приборы и методы измерений*. – 2024. – Vol. 15 (3). – С. 213–220. – DOI 10.21122/2220-9506-2024-15-3-213-230.
7. Исследование плотности образцов из терморасширенного графита акустическим амплитудно-теневым методом / *О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Блинова, Д. В. Злобин* // *Дефектоскопия*. – 2023. – № 8. – С. 21–31. – DOI 10.31857/S0130308223080031. – EDN DYTIAI.
8. *Богдан, О. П.* Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим

методом / О. П. Богдан, А. В. Блинова, Л. А. Денисов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 97–105. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105. – EDN HMAOQ.

9. *Cramer, O.* The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1993. – Vol. 93, no. 5. – С. 2510-2516.

L. A. Denisov¹, K. Yu. Belosludtsev¹, postgraduates

O. V. Murav'eva^{1,2,✉}, DSc in engineering, prof.

E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Influence of Temperature Effect on Acoustic Wave Propagation through Porous Media

Porous sheet materials are of great interest from the point of view of acoustic defectoscopy and structuroscopy. The problem of wide application of acoustic methods of porous sheet inspection is the difficult for mathematical description dependence of acoustic parameters on the medium parameters. The paper presents the results of investigation of the influence of temperature of sheets of thermally expanded graphite (TEG), polyethylene foam (EPE) and environment on the value of transparency coefficient during measurements by the amplitude-shadow method of acoustic control. Comparison of the obtained values of the transmittance coefficient with the model of acoustic impedance changes was performed. Based on the obtained values, an additional influence of the temperature-dependent attenuation coefficient on the transmission coefficient was revealed.

Keywords: porous media, amplitude shadow method, temperature influence, transmission coefficient.

УДК 620.179.16

К. В. Колпаков, аспирант
Г. С. Хозяйкин ✉, магистрант

А. А. Понькина, аспирант

Е-mail: grigory.hozyaikin@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Подход к оценке неравномерности толщины стенки листа с использованием нормальных волн в условиях анизотропии свойств*

Рассмотрены тонкости подхода к оцениванию изменения толщины стенки листов с использованием дисперсионных свойств скорости нормальных волн Лэмба моды S_0 . Поставлено экспериментальное исследование по определению мешающих факторов при толщинометрии стальных листов разными способами и проведено их сравнение.

Ключевые слова: волны Лэмба, измерение толщины, мешающие факторы, анизотропия скорости, толстые листы.

Введение

Основной причиной уменьшения толщины стенки стальных листов является возникновение коррозии и эрозии, причем наиболее подвержены таким дефектам труднодоступные участки (подземные, забетонированные и т. д.), контроль которых невозможен стандартными УЗ-толщиномерами, требующими санирования всей поверхности объекта. Проверка таких участков возможна при помощи нормальных волн Лэмба, скорость которых на определенных частотах имеет дисперсионную зависимость от толщины [1–3].

Оценка изменения толщины стенки стальных труб и листов возможна при анализе дисперсионных изменений скорости нормальных волн, прошедших фиксированное расстояние между источником и приемником [4–6]. Однако в предложенных методиках не учитываются такие

© Колпаков К. В., Хозяйкин Г. С., Понькина А. А., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

мешающие факторы, как анизотропия свойств и диаграмма направленности преобразователей [7–9].

Цель работы – определить влияние анизотропных свойств на оценку изменения толщины стенки толстого стального листа при помощи симметричных волн Лэмба моды S_0 .

Описание эксперимента

Стандартный способ определения анизотропных свойств листов – круговое сканирование, при котором преобразователи перемещаются по окружности определенного диаметра с некоторым шагом от 0 до 180 градусов, как показано на рис. 1, *а*. Такой способ требует доступа к большой площади поверхности и часто невозможен к применению в реальных условиях.

Предлагаемая схема расположения источников и приемников, приведенная на рис. 1, *б*, заключается в расположении преобразователей на противоположных сторонах квадратной сетки с последовательным перемещением преобразователей: сначала излучатель устанавливается в положение «И1», приемник перемещается последовательно от положения «П1» до положения «П9». После этого источник переставляется в положение «И2» и перемещение приемника повторяется. При таком размещении преобразователей требуется доступ только к боковым граням листа.

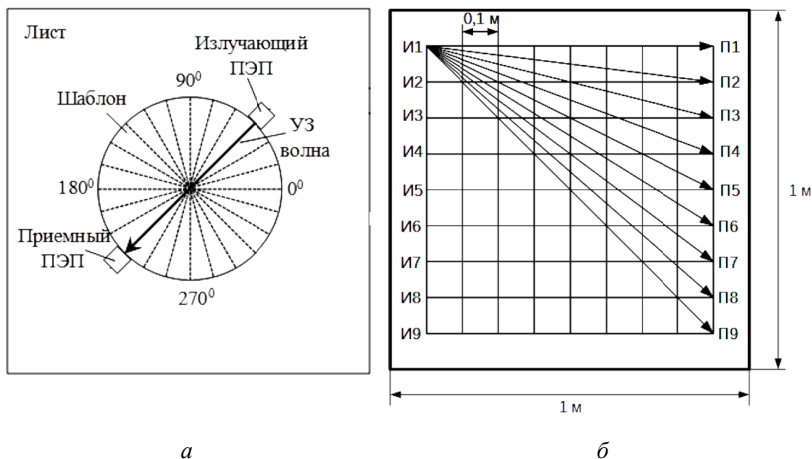


Рис. 1. Схемы шаблонов позиций излучения и приема нормальных волн: круговое (*а*) и параллельное (*б*) размещение преобразователей

Результаты и их обсуждение

Для сравнения двух способов измерения анизотропии для одного и того же листа толщиной 8 мм были построены графики. Зависимость скорости от направления для первого (кругового) шаблона приведена на рис. 2, *а*, а для второго – на рис. 2, *б*. Скорость волны Лэмба C определялась по формуле

$$C = \frac{t - t_p}{s}, \quad (1)$$

где t – время начала первого зарегистрированного импульса; t_p – время задержек в пьезопреобразователях; s – расстояние, пройденное акустической волной.

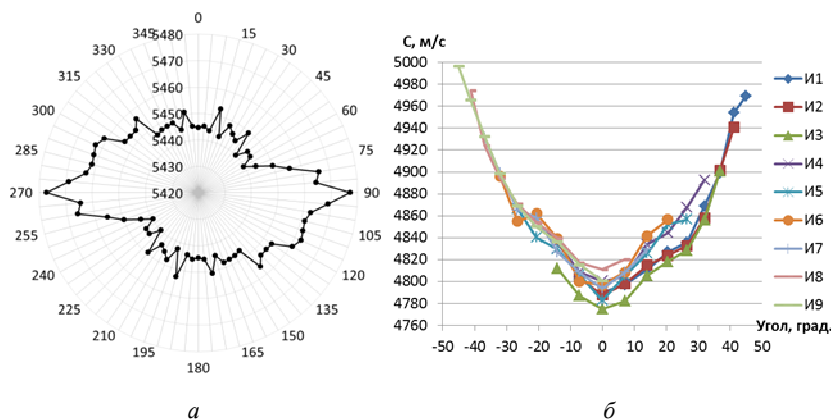


Рис. 2. Графики анизотропии скорости в толстом листе при круговом (*а*) и параллельном (*б*) размещении преобразователей

На графиках видно, что зависимости имеют аналогичную тенденцию. В направлении, принятому за ноль градусов, наблюдается минимум скорости, а при плавном перемещении к перпендикулярному направлению скорость начинает возрастать.

Недостатком данного метода является неравномерность диаграммы направленности преобразователей, вследствие которой излучение волн Лэмба под разными углами имеет различную задержку в преобразователе. Неравномерность задержки в преобразователе приводит к отклонению значений скоростей, полученных двумя разными методами.

Выводы

Предложенный способ позволяет получить данные анизотропии скорости волн Лэмба в стальном листе без доступа ко всей площади поверхности. Анизотропия скорости и неравномерность диаграммы направленности пьезопреобразователей нормальных волн могут оказывать значительное влияние на результаты и должны учитываться при оценке толщины стенки листов при помощи нормальных волн Лэмба.

В перспективе предстоит анализ применимости предложенного подхода для оценки неравномерности толщины стенки листа, для чего необходимо провести сравнение графика, представленного на рис. 2, б, с графиком, полученным по шаблону с рис. 1, б на листе с искусственно созданным дефектом в виде области с уменьшением толщины, а также с учётом неравномерности диаграммы направленности скорости волн Лэмба и их задержки в преобразователях.

Список использованных источников и литературы

1. Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, Т. И. Земсков [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 13–19. – EDN: TIIOPS.
2. *Instanes, G. Corrosion-Erosion Monitoring Systems for Manageing Asset Integrity* / G. Instanes, A. O. Pedersen // Collection of materials of Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, 2017. – № SPE-188949-MS. – DOI: 10.2118/188949-MS.
3. Пат. 2540942 Рос. Федерация : МПК G01B 17/02 (2006.01). Способ контроля за динамикой изменения толщины стенки контролируемого объекта / Терентьев Д. А. – Заявка № 2013149631/28 от 07.11.2013. – Оpubл. 10.02.2015. – Бюл. № 4.
4. *Муравьева, О. В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката* / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11. – EDN WYCBJV.
5. Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами / А. А. Хлыбов, А. Л. Углов, Д. А. Рябов, М. С. Аносов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 18–26. – DOI 10.22213/2413-1172-2022-4-18-26. – EDN QKYSZD
6. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
7. Анизотропия акустических свойств в тонколистовом прокате низкоуглеродистой марганцовистой стали / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова [и др.] // Дефектоскопия. – 2024. – № 11. – С. 15–29. – EDN: AAGJDA.

8. *Муравьев, В. В.* Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова // *Сталь*. – 2016. – № 10. – С. 75–79. – EDN: XHNBVBB.

9. *Волкова, Л. В.* Сравнительный анализ акустической анизотропии труб и листов с использованием SH- и tH-волн / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, К. В. Колпаков // *Дефектоскопия*. – 2023. – № 8. – С. 68–70. – EDN: DZHS AJ.

K. V. Kolpakov, postgraduate

G. S. Khozyaikin , master student

A. A. Ponkina, postgraduate

E-mail: grigory.hozyaikin@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

An approach to Estimating the Unevenness of the Sheet Wall Thickness Using Guided Waves under Conditions of Anisotropy of Properties

The subtleties of the approach to estimating changes in the wall thickness of sheets using the dispersion properties of the velocity of normal Lamb waves of the S_0 mode are considered. An experimental study was conducted to determine the interfering factors in the thickness measurement of steel sheets in different ways and their comparison was carried out.

Keywords: Lamb waves, thickness measurement, interfering factors, velocity anisotropy, thick sheets.

УДК 620.179.14

А. М. Матосян ^{✉ а}, инженер-исследователь
А. Н. Сташков, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.
А. П. Ничипурук, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.
Н. В. Гордеев ^{✉ а}, инженер-исследователь
E-mail: ^а matosian01@gmail.com

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева,
Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Способы улучшения характеристик аппаратуры для оценки механических напряжений в углеродистых сталях*

Реализованы улучшенные способы генерации и детектирования сигналов индукционного преобразователя, входящего в состав мобильного магнитного структуроскопа для оценки механических напряжений в углеродистых сталях. Благодаря реализованным схмотехническим решениям уменьшены массогабаритные характеристики аппаратуры, повышена автономность, что позволило расширить спектр ее возможных применений.

Ключевые слова: сталь, деформация, механические напряжения, магнитный структуроскоп, генерация и детектирование сигналов.

Введение

Контроль и оценка механических напряжений является важной научно-технической проблемой, решение которой возможно с помощью различных физических методов [1–5]. Одним из наиболее перспективных является магнитный метод из-за его высокой чувствительности к механическим напряжениям.

На основе магнитного метода оценки механических напряжений [6] был разработан переносной прибор для измерения обратимой магнитной проницаемости [7]. Однако из-за применения тяжелых свинцовых аккумуляторов, а также ноутбука и дорогостоящей платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для оцифровки и обработки сигнала применение данного прибора в полевых условиях было ограничено.

Целью работы является модернизация магнитометрического структуроскопа тракта генерации и приема сигналов индукционного преобра-

© Матосян А. М., Сташков А. Н., Ничипурук А. П., Гордеев Н. В., 2025

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030–1).

зователя, улучшение массогабаритных характеристик структуроскопа и уменьшение стоимости его компонентов.

Методика оценки механических напряжений в сталях

Наличие сжимающих напряжений в ферромагнитном образце с положительным знаком магнитострикции приводит к формированию магнитной анизотропии типа «легкая плоскость», заключающейся в преимущественной ориентации магнитных доменов перпендикулярно действующим напряжениям, а также к влиянию на процессы смещения преимущественно 90-градусных доменных границ. Это приводит к изменению формы полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости [6]. На рис. 1 приведены для примера кривые для недеформированного и пластически деформированного растяжением образцов из малоуглеродистой стали СтЗсп.

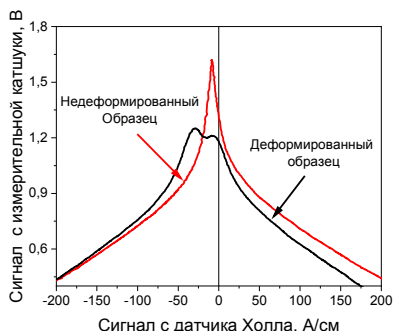


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, пропорциональные обратимой магнитной проницаемости недеформированного и деформированного образцов из стали СтЗсп

Магнитный структуроскоп для оценки механических напряжений в сталях

Для измерения полевых зависимостей обратимой магнитной проницаемости в полевых условиях используется первичный преобразователь в виде приставного электромагнита (ПЭМ), в межполюсном пространстве которого находится индукционный преобразователь (ИП) и датчик Холла. Индукционный преобразователь состоит из возбуждающей и измерительной катушки. С помощью ПЭМ проводится перемагничивание участка контролируемого объекта (КО) по предельной петле гистерезиса, а возбуждающая катушка ИП создает дополнительное к основному подмагничивающее переменное поле, амплитуда которого много меньше

коэрцитивной силы КО. В измерительной катушке ИП индуцируется ЭДС, пропорциональная обратимой магнитной проницаемости КО.

Выбор частоты переменного поля (от десятков Гц до единиц кГц), создаваемого возбуждающей катушкой, позволяет изменять глубину съема информации с поверхности КО (из-за скин-эффекта). В модернизированном приборе [7] в качестве формирователя сигналов для возбуждающей и намагничивающей катушек выступал АЦП/ЦАП, управляемый программой на ноутбуке. В модернизированном приборе генерация сигнала для возбуждающей катушки осуществляется с помощью программируемого генератора сигналов на базе микросхемы AD9833, что позволило упростить схему и уйти от управления операционной системой Windows.

Током в намагничивающих катушках ПЭМ управляет микроконтроллер, подавая сигналы на усилитель мощности собранного по схеме источника тока, управляемого напряжением (ИТУН). Данное решение позволило более гибко управлять намагничивающим током.

Вместо прямой оцифровки полезного сигнала с измерительной катушки дорогостоящим АЦП/ЦАП с последующей обработкой на ноутбуке в модернизированном приборе сигнал обрабатывается с помощью синхронного детектора, собранного на микросхеме AD630.

Выделение переменного сигнала на заданной частоте осуществляется благодаря умножению опорного сигнала с заданной частотой и сигнала с измерительной катушки. Сигнал на выходе синхронного детектора можно представить в виде

$$\begin{aligned} V &= V_s V_r \sin(w_s t + \varphi_s) \sin(w_r t + \varphi_r) = \\ &= 0,5 V_s V_r \cos([w_s - w_r]t + \varphi_s - \varphi_r) - \\ &\quad - 0,5 V_s V_r \cos([w_s + w_r]t + \varphi_s + \varphi_r) \end{aligned} \quad (1)$$

где V_s , V_r – амплитуды входного и опорного сигналов; w_s , w_r – круговая частота входного и опорного сигналов; φ_s , φ_r – фаза входного и опорного сигналов; t – время.

После применения фильтра нижних частот сигнал приобретает вид:

$$V = 0,5 V_s V_r \cos(\varphi_s - \varphi_r). \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что выходной сигнал зависит от амплитуд входного сигнала и опорного, а также их разности фаз. Разность фаз между сигналами меняется как из-за изменения частоты переменного подмагничивающего поля, так и из-за изменения намагничивающего поля во время измерения. Условием детектирования максимального сигнала V согласно (2) является нулевая разность фаз. Изменения разно-

сти фаз во время измерения не превышают 3 градусов, и это не вызывает больших изменений сигнала I .

Управление прибором осуществляется с помощью 32-битного микроконтроллера Atmel. Оцифровка сигналов после синхронного детектора и с датчика Холла осуществляется с помощью АЦП микроконтроллера. Измеренные данные отображаются на экране прибора и могут передаваться по беспроводной связи Bluetooth на другое устройство для дальнейшей обработки. Питание прибора осуществляется от сборки литиевых аккумуляторов, позволивших отказаться от тяжелых свинцовых аккумуляторов, применявшихся ранее, что позволило существенно уменьшить массогабаритные характеристики прибора. На рис. 2 приведены структурная схема и общий вид прибора. Размеры модернизированного прибора $190 \times 190 \times 115$ мм, масса – 3 кг.

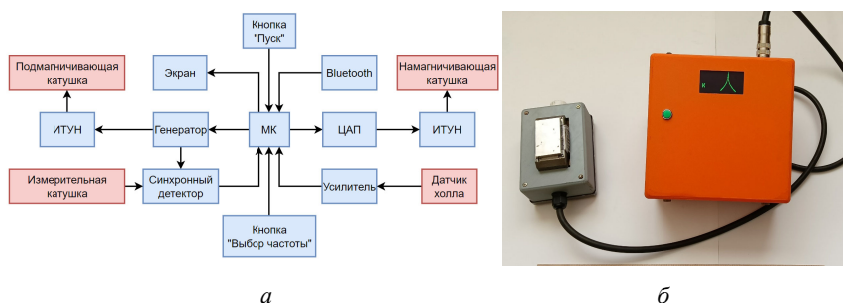


Рис. 2. Структурная схема (а) и общий вид (б) структуроскопа

Выводы

Реализованы улучшенные способы генерации и детектирования сигналов индукционного преобразователя, входящего в состав мобильного магнитного структуроскопа для оценки механических напряжений в углеродистых сталях. Благодаря реализованным схемотехническим решениям уменьшены массогабаритные характеристики аппаратуры, повышена автономность, что позволило расширить спектр ее возможных применений.

Список использованных источников и литературы

1. Рыжова, А. О. Использование метода акустоупругости для контроля упругих механических напряжений в материале колец подшипников / А. О. Рыжова, С. А. Бехер, А. А. Попков // Дефектоскопия. – 2020. – № 11. – С. 28–37. – EDN BGTKTX.

2. Investigation of surface residual stress profile on martensitic stainless steel weldment with X-ray diffraction / I. I. Ahmed, J. A. Adebisi, S. Abdulkareem, A. H. Sherry // Journal of King Saud University-Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 30, no. 2. – Pp. 183-187.
3. New feature extraction for applied stress detection on ferromagnetic material using magnetic Barkhausen noise / S. Ding, G. Y. Tian, V. Moorthy, P. Wang // Measurement. – 2015. – Vol. 73. – Pp. 515–519.
4. Neutron diffraction measurements of residual stress in additively manufactured stainless steel / D. W. Brown, J. D. Bernardin, J. S. Carpenter, B. Clausen, D. Spornjak, J. M. Thompson // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 678. – Pp. 291-298.
5. Magnetic incremental permeability non-destructive evaluation of 12 Cr-Mo-WV Steel creep test samples with varied ageing levels and thermal treatments / B. Gupta, T. Uchimoto, B. Ducharme, G. Sebal, T. Miyazaki, T. Takagi // NDT & E International. – 2019. – Vol. 104. – Pp. 42-50.
6. Методика и устройство для безградуировочного определения величины остаточных сжимающих напряжений в деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях / А. П. Ничипурук, А. Н. Сташков, В. Г. Кулеев, Е. А. Щапова, А. А. Осипов // Дефектоскопия. – 2017. – № 11. – С. 20–26. – EDN ZQTCKR.
7. *Сташков, А. Н.* Мобильный магнитометрический комплекс для контроля остаточных механических напряжений в стальных конструкциях / А. Н. Сташков, А. П. Ничипурук, Е. А. Щапова // Научное приборостроение. – 2019. – Т. 29, № 1. – С. 47–54. – EDN ZCTQVF.

A. M. Matosyan ^{✉ a}, research engineer

A. N. Stashkov, CSc in engineering, leading researcher

A. P. Nichipuruk, DSc in engineering, chief researcher

N. V. Gordeev ^{✉ a}, research engineer

E-mail: ^a matosian01@gmail.com

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Ways to Improve the Performance of Apparatus for Assessing Mechanical Stresses in Carbon Steels

Improved methods for generating and detecting signals from an induction transducer included in a mobile magnetic structroscope for evaluating mechanical stresses in carbon steels have been implemented. Thanks to the implemented circuit design, the weight and size characteristics of the equipment have been reduced, and autonomy has been increased, which has made it possible to expand the range of its possible applications.

Keywords: steel, deformation, mechanical stresses, magnetic structroscope, signal generation and detection.

УДК 620.179.16

О. В. Муравьева^{1,2,✉}, д-р техн. наук, проф.
*К. Ю. Белослудцев*¹, *А. С. Хомутов*¹, *К. А. Торхов*¹, аспиранты
*В. А. Горбунов*¹, студент
E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Ижевск, Россия

Моделирование процесса распространения акустической волны по сечению трубы с неравномерностью толщины стенки*

В работе рассмотрена модель распространения акустических волн по сечению трубы малого диаметра с неравномерной толщиной стенки трубы в условиях одновременного прозвучивания по периметру окружности. Выполнен численный расчет влияния неравномерности стенки трубы на вид получаемых эхogramм.

Ключевые слова: неравномерность толщины стенки, толщинометрия, акустический зеркально-теневой метод, распространение акустической волны, моделирование.

Введение

Трубы малого диаметра нашли широкое распространение в нефтедобывающей промышленности, в частности, для цилиндров и плунжеров штанговых глубинных насосов. Для обеспечения долговечности к последним предъявляются жесткие требования соблюдения геометрии наружных и внутренних диаметров и толщины стенки трубы [1–3].

Для решения задач толщинометрии при неразрушающем контроле широкое применение находят ультразвуковые методы [4–7], основанные на измерении времени прихода акустического импульса, переотраженного на противоположной стенке трубы. Для оценки неравномерно-

© Муравьева О. В., Белослудцев К. Ю., Хомутов А. С., Торхов К. А., Горбунов В. А., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

сти толщины стенки требуется сканирование по образцу, что существенно снижает производительность контроля.

Цель данной работы – моделирование процесса распространения акустической волны по сечению трубы при одновременном возбуждении по огибающей цилиндра с целью выявления неравномерности толщины стенки.

Материалы и методы

Постановка задачи по моделированию представлена на рис. 1, *а*, где R_H – наружный радиус трубы, R_B – внутренний радиус трубы. Полагается, что продольная волна l возбуждается излучателями с каждой точки наружной поверхности по периметру трубы. Многократно переотраженная от внутренней и внешней стенок, она принимается тем же преобразователем.

Неравномерность стенки моделируется смещением центра окружности на величину h (рис. 1, *б*).

В общем случае моделируемая серия импульсов $U_\Sigma(r_i)$ может быть описана формулой

$$U_\Sigma(r, t) = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L U(n_k \cdot 2r_l, t), \quad (1)$$

где $U(2r_l n_k, t)$ – зондирующий импульс от элементарного излучателя, прошедший расстояние $2r_l$ до элементарного приемника; t – время зондирующего импульса; L – число элементов суммирования по всей окружности, определяемое выражением $L = 2\pi r / \Delta l$; Δl – размер одного элементарного излучателя, K – число переотражений по диаметрам трубы. При равномерной толщине стенки трубы $r_i = r$ (отсутствие отклонения). Для неравномерной r_i – функция от $h = r_{\max} - r_{\min}$ (отклонение центра внутренней окружности от центра внешней окружности).

Зависимость зондирующего импульса от времени описывается выражением

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(2\pi f t), \quad (2)$$

где β – коэффициент затухания, пропорциональный частоте f [1/с]; U_0 – амплитуда зондирующего импульса. Пренебрегая потерями, обусловленными затуханием и расхождением волн и фазовыми сдвигами при отражении, для равномерной стенки трубы серия многократных переотражений представляет собой незатухающие импульсы (рис. 2, *а*).

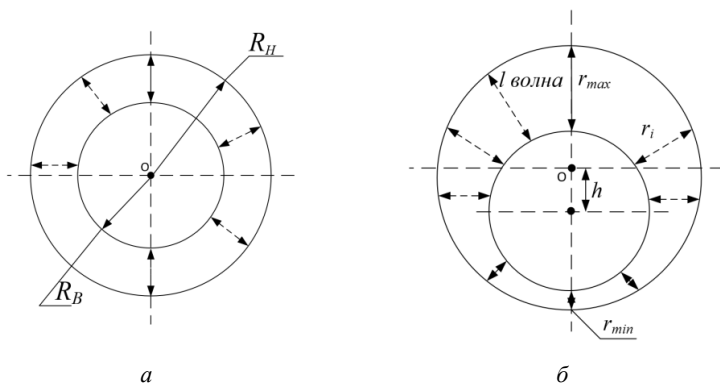


Рис. 1. Модель процесса распространения волны по сечению трубы с равномерной (а) и неравномерной (б) толщиной стенки

Результаты и обсуждение

Результатом моделирования в программном обеспечении Mathcad является серия многократных отражений по толщине стенки трубы с наружным радиусом (R_H) 28,4 мм и внутренним (R_B) 22,17 мм, используемой при производстве цилиндров глубинных штанговых насосов. В случае равномерной толщины стенки вследствие того, что все сигналы приходят в одной фазе, серия импульсов является незатухающей. При неравномерной толщине стенки в серии импульсов наблюдается запаздывание одного импульса относительно другого, при этом формируется серия импульсов, представленная на рис. 2, б.

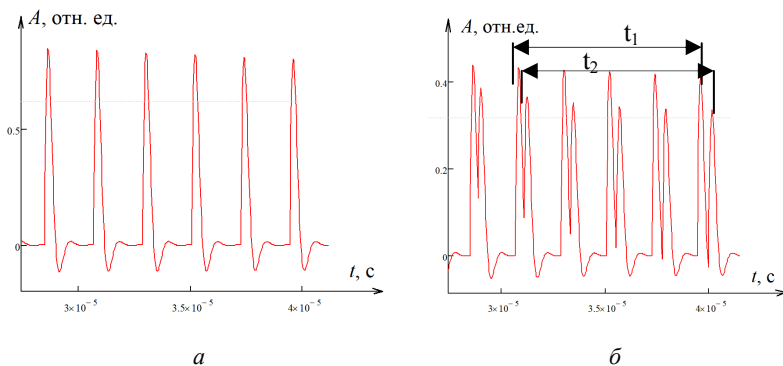


Рис. 2. Осциллограммы серии многократных отражений для труб с равномерной (а) и неравномерной (б) толщиной стенки

В работе использован диапазон неравномерностей h от 0,02 до 0,38 мм с шагом в 0,02 мм и рабочей частотой 10 МГц.

Проведен расчет времени задержки импульсов при различной неравномерности толщины стенки трубы по формуле

$$\Delta t = (t_2 - t_1), \quad (3)$$

где t_2 – время между m -м и n -м импульсами для участка с максимальной толщиной стенки трубы; t_1 – разность времени между m -м и n -м импульсами для участка с минимальной толщиной стенки трубы.

На рис. 3 представлена зависимость времени запаздывания от неравномерности толщины стенки трубы.

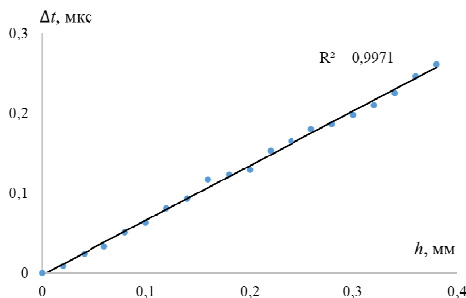


Рис. 3. График зависимости времени запаздывания импульсов от неравномерности толщины стенки трубы

Наблюдается однозначная линейная прямопропорциональная зависимость между измеренным временем запаздывания и неравномерностью толщины стенки трубы h , которая выражается уравнением

$$h = \frac{\Delta t}{0,684}. \quad (4)$$

Выводы

Предложена модель процесса распространения акустической продольной волны по периметру стенки трубы с неравномерностью по толщине.

Предложен новый информативный параметр времени запаздывания для оценки степени неравномерности толщины стенки трубы как разницы между ее максимальным и минимальным значениями.

Список использованных источников и литературы

1. Влияние длительной эксплуатации на физико-механические свойства и показатели хладостойкости трубной стали 10Г2 / А. А. Хлыбов, Ю. Г. Кабалдин, М. С. Аносов, Д. А. Рябов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 38–44. – DOI 10.22213/2413-1172-2021-1-38-44. – EDN RBVSYR.
2. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров, В. Б. Харитонов, В. Н. Чаплыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 4. – С. 103–107. – EDN TFIYML.
3. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов, К. А. Торхов, П. Н. Пушин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024 – Т. 27, № 3 – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.
4. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
5. *Муравьева, О. В.* Возможности электромагнитно-акустического метода многократной тени при контроле резьбы насосных штанг / О. В. Муравьева, П. Н. Пушин, К. А. Торхов // Дефектоскопия. – 2023. – № 9. – С. 58–60. – DOI 10.31857/S0130308223090075. – EDN ECRKER.
6. Wall thickness measurement and defect detection in ductile iron pipe structures using laser ultrasonic and improved variational mode decomposition / Shuai Chen, Haitao Wang, Yi Jiang, Kai Zheng, Shifeng Guo // NDT & E International. – 2023. – Vol. 134. – Art. no. 102767. – ISSN 0963-8695. – URL <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102767>.
7. Ultrasonic thickness measuring in-pipe robot for real-time non-destructive evaluation of polymeric spray linings in drinking water pipe infrastructure / Sathira Wickramanayake, Karthick Thiyagarajan, Sarath Kodagoda, Lasitha Piyathilaka // Mechatronics. – 2022. – Vol. 88. – Art. no. 102913. – ISSN 0957-4158. – URL <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2022.102913>.

O. V. Murav'eva^{1,2,✉}, DSc in engineering, prof.
*K. Yu. Belosludtsev*¹, *A. S. Khomutov*¹, *K. A. Torkhov*¹, postgraduates
*V. A. Gorbenov*¹, student
E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Izhevsk, Russia

Modeling of the Acoustic Wave Propagation Process along the Pipe Section with Uneven Wall Thickness

The paper considers a model of acoustic wave propagation along the cross section of a small diameter pipe with an uneven pipe wall thickness under conditions of simultaneous sounding along the perimeter of the circle. A numerical calculation of the effect of the unevenness of the pipe wall on the appearance of the resulting echograms has been performed.

Keywords: unevenness of wall thickness, thickness measurement, acoustic mirror-shadow method, acoustic wave propagation, modeling.

УДК 620.179.162

О. В. Муравьева^{1, 2, ✉^a}, д-р техн. наук, проф.*П. А. Шихарев*^{1, ✉^b}, аспирантE-mail: ^a pmkk@istu.ru, ^b pashaplay@mail.ru¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия² Удмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Сравнительная оценка затухания крутильной волны в пружине и прямолинейном прутке, изготовленных из пружинной проволоки из стали 54SiCr6*

В статье представлен анализ затухания крутильной волны в пружине в сравнении с пружинной проволокой. Методика проведения анализа основана на применении зеркально-теневого метода многократных отражений и спектральном анализе дискретного сигнала.

Ключевые слова: крутильная волна, затухание, пружина, спектр.

Введение

Волноводный метод неразрушающего контроля предназначен для протяженных объектов, длина которых многократно превышает размеры поперечных сечений. Используемые типы волн (стержневая и крутильная) отличаются малой дисперсией скорости или ее отсутствием (для крутильной волны) [1]. Благодаря отсутствию потерь на расхождение указанные волны ослабляются лишь за счет затухания в материале объекта контроля [2]. Контроль пружин волноводным методом может быть затруднен ввиду сложной геометрии контролируемого образца и переломов акустических волн.

Целью работы является определение контролепригодности пружины волноводным методом, в частности – прозвучивание крутильной волной и оценка ее затухания, в сравнении с прямолинейным протяженным объектом – прутком.

© Муравьева О. В., Шихарев П. А., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

Материалы и методы

В статье представлены результаты спектрального анализа [3, 4] осциллограмм импульсов крутильных волн при многократных отражениях в пружине и пружинной проволоке [5, 6].

В качестве объектов контроля были выбраны бездефектная пружина длиной навитого прутка 180 см и пружинная проволока длиной 160 см, изготовленные из стали 54SiCr6 диаметром сечения 12 мм. Работа основана на зеркально-теневом методе на многократных отражениях и реализуется при помощи посылки акустических импульсов в тело пружины и прутка со стороны торца с последующей регистрацией отраженных сигналов [7]. В качестве излучателя и приемника сигнала используются датчики, изготовленные из пьезоэлектрических пластин. Излучатель и приемник располагаются с одной стороны контролируемого образца.

Результаты и их обсуждение

Результаты регистрации многократно отраженных сигналов зондирующего импульса крутильной волны представлены на рис. 1, 2, где U – амплитуда сигнала, t – время.

Спектральный анализ исследуемых осциллограмм позволяет оценить коэффициент затухания крутильной волны в пружине и прутке.

Видно, что осциллограмма прозвучивания пружины крутильной волной имеет значительно меньшую амплитуду сигнала, больший период отраженных сигналов и значительное количество акустического шума в сравнении с осциллограммой прозвучивания прутка крутильной волной.

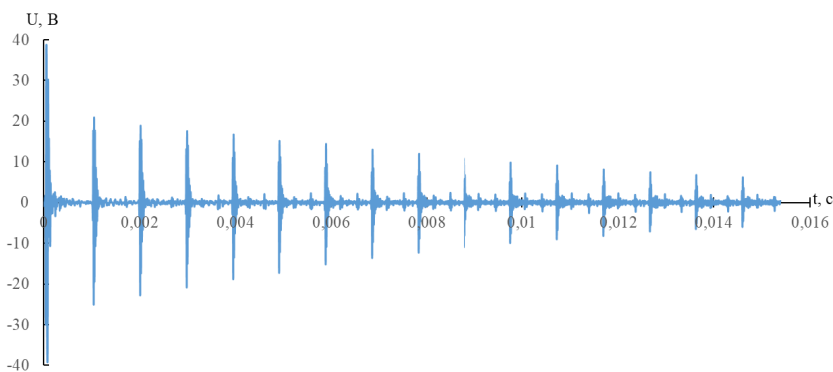


Рис. 1. Осциллограмма прозвучивания прутка крутильной волной

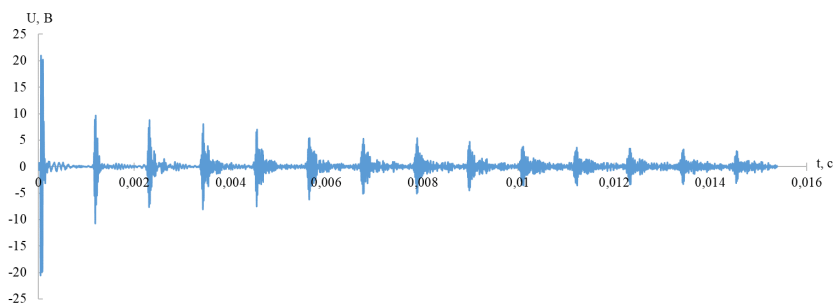


Рис. 2. Осциллограмма прозвучивания пружины крутильной волной

При помощи быстрого преобразования Фурье вычисляем спектры первых пяти отраженных импульсов (рис. 3, 4).

Максимум спектра совпадает по значению с основной частотой излучаемого сигнала крутильной волны. Для прутка – 58,6 кГц, для пружины – 56,2 кГц (рис. 5).

Исходный сигнал задан функцией

$$U(r) = U_0 e^{-\delta r}, \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда сигнала в начальный момент времени, В; δ – коэффициент затухания, 1/м; r – расстояние, пройденное волной, м.

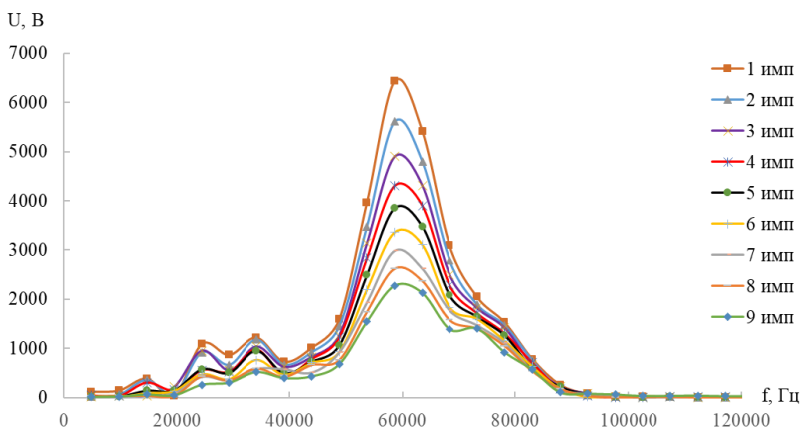


Рис. 3. Спектры пяти отражений крутильной волны в прутке

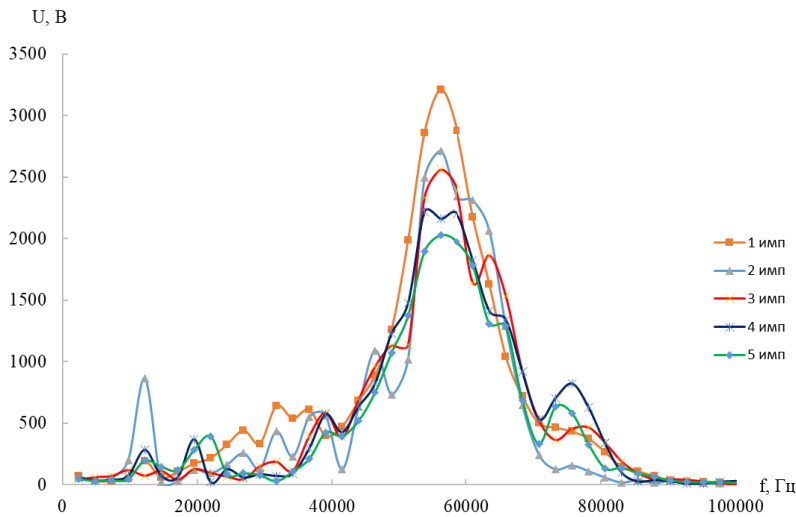


Рис. 4. Спектры пяти отражений крутильной волны в пружине

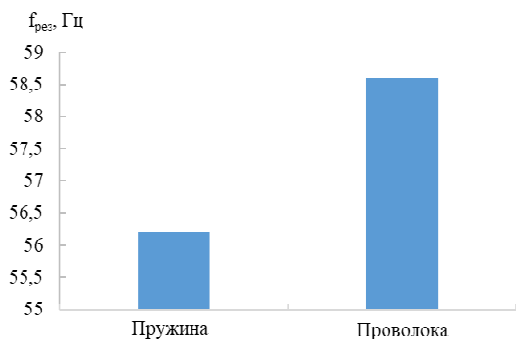


Рис. 5. Резонансные частоты крутильной волны в пружине и проволоке

Исходя из формулы (1), коэффициент затухания δ определяется формулой

$$\delta = \frac{U_1/U_2}{r_2-r_1}. \tag{2}$$

Подставив значения амплитуды на основной частоте спектров сигналов из рис. 3 и 4 в формулу (2), получаем значения коэффициента затухания крутильной волны в пружине и прутке. Коэффициент затухания для крутильной волны в прутке составил $\delta = 0,041$ 1/м, для крутильной

волны в пружине $\delta = 0,032$ 1/м. Нисходящий экспоненциальный тренд амплитуды спектра сигнала приведен на рис. 6 и 7.

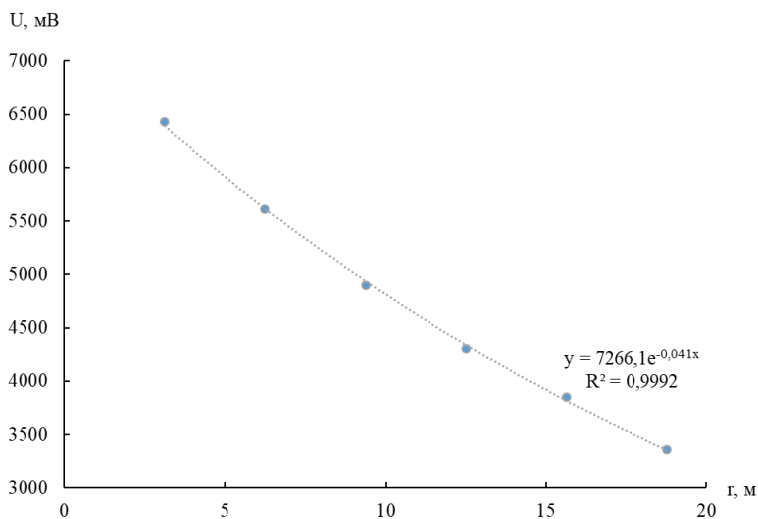


Рис. 6. Затухание сигнала с прохождением расстояния в прутке

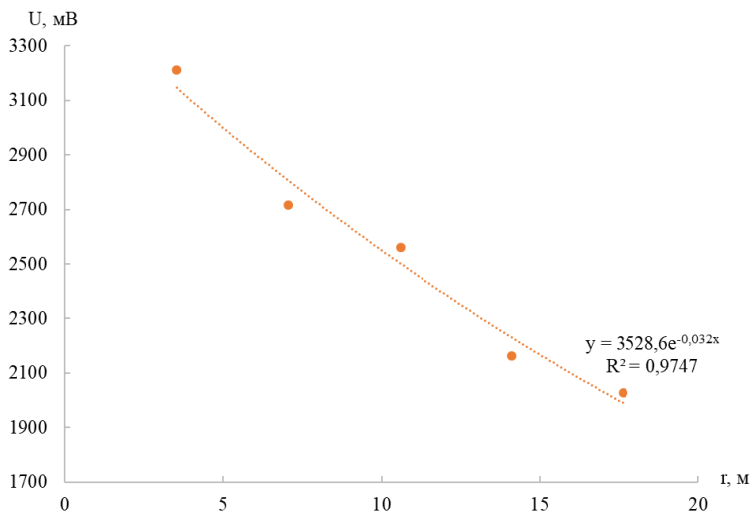


Рис. 7. Затухание сигнала с прохождением расстояния в пружине

Скорость крутильной волны в пружине составляет 3150 ± 5 м/с, скорость крутильной волны в пружинной проволоке составляет 3196 ± 5 м/с.

Заключение

В результате проведенного исследования были рассчитаны коэффициенты затухания крутильной волны в пружине и пружинной проволоке. Для пружины коэффициент затухания составил $\delta = 0,032$ 1/м, для проволоки $\delta = 0,041$ 1/м. Установлено, что коэффициент затухания крутильной волны имеет нелинейную зависимость от частоты колебаний. Практическая значимость исследования заключается в возможности разработки методики прогнозирования динамики затуханий крутильных колебаний в пружинах. Рассчитаны скорости крутильной волны в пружине и пружинной проволоке. Скорость крутильной волны в пружине составила 3150 ± 5 м/с, в пружинной проволоке – 3196 ± 5 м/с. Результаты исследования показали, что контроль пружин волноводным методом затруднен ввиду ее сложной геометрии, осциллограмма регистрируемого сигнала содержит большее количество сопутствующих шумов по сравнению с осциллограммой крутильной волны в прутке.

Список использованных источников и литературы

1. *Муравьева, О. В.* Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2013. – № 2. – С. 43–51. – EDN QJGKTJ.
2. *Муравьева, О. В.* Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, Ю. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9 – С. 3–10. – EDN WYCBPZ.
3. *Стрижак, В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 5–15. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. – EDN NZFFOP.
4. *Стрижак, В. А.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 159–166. – DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166. – EDN XPTZXN.
5. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – Т. 19, № 3 (71). – С. 46–50. – EDN WMIESF.
6. *Данилов, В. Н.* Об особенностях характеристик спектра и импульса эхосигнала при ультразвуковом контроле металла через наплавленный слой на-

клонными преобразователями продольных волн / В. Н. Данилов // Контроль. Диагностика. – 2023. – № 8. – С. 4–16. – EDN SMWIEH.

7. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – № 1. – С. 78–88. – EDN ZBAFKH.

O. V. Muravyeva^{1,2, ✉^a}, DSc in engineering, prof.

P. A. Shikharev^{1, ✉^b}, postgraduate

E-mail: ^apmkk@istu.ru, ^bpashaplay@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Comparative Evaluation of Torsional Wave Attenuation in a Spring and a Straight Rod Made of 54SiCr6 Steel Spring Wire

The article presents an analysis of the attenuation of a torsional wave in a spring in comparison with a rod made of a spring wire. The method of analysis is based on the use of the mirror-shadow method of multiple reflections and spectral analysis of a discrete signal.

Keywords: torsional wave, attenuation, spring, spectrum.

УДК 611.08/612

Г. С. Пестерев^{1, ✉}, студент
*А. Р. Мухаметзянова*², студент
*С. Б. Егоркина*², д-р мед. наук, доц.
E-mail: grishap2018@mail.ru

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

Концепция создания вибромассажера, настраиваемого на резонансную частоту участка тела человека

В данной статье рассматривается предполагаемый механизм воздействия вибраций на организм человека. Целью проекта является теоретическое обоснование идеи создания вибромассажера, который обеспечивает в процессе работы подбор резонансной частоты для определенных зон тела. В основе работы прибора будет положен принцип обратной биологической связи – связи, при которой устанавливается биологическая обратная связь с организмом на основе изменения различных параметров (пульсовой волны, мышечной силы, артериального давления).

Ключевые слова: обратная биологическая связь, вибрация, вибромассажер, резонансная частота.

Влияние вибромеханических воздействий на человека

Применение вибростимулирования в фитнесе и на лечебных процедурах основано на том, что в основе жизнедеятельности организма лежат колебательные процессы [1–3]. Организм воспринимает внешние сигналы через различные рецепторы, одни из которых – механорецепторы – преобразуют механические импульсы в биопотенциалы, которые и передают информацию о характеристиках раздражителя в ЦНС.

Независимо от места приложения вибрационного раздражения повышается общенергетическая обеспеченность всего организма, что проявляется интенсификацией тканевого дыхания и окислительно-восстановительных процессов в организме [4].

Явление биологического резонанса

В биологических системах любой сложности возможно явление биологического резонанса. При таком резонансе наблюдается максималь-

ный биологический эффект, так как величина рефлекторного ответа нервно-мышечного аппарата на участке воздействия наиболее высока при частоте колебаний, находящихся в соответствии с резонансными особенностями субстрата. Поэтому, например, при травме нерва вибрационный массаж с резонансной частотой оказывает более высокий стимулирующий эффект по сравнению с другими частотами [4–6].

Недостатки применяемых вибромассажеров

В результате исследования проблем физиотерапии и вибротерапии, проведенного коллективом междисциплинарных исследователей, было выявлено, что недостатком распространенных методов вибро- и физиотерапии является работа вибромассажеров на фиксированных частотах [7].

В большинстве вибростимуляторов значение частоты генерируемых вибраций задается вручную, от 3 Гц до 200 Гц и с амплитудой от 1 до 5–7 мм [7]. Изменение частоты задается вручную, а амплитуда колебаний регулируется силой контакта вибротода (вибрирующей головки) с телом пациента.

Из-за того, что подбор частоты вибраций происходит вручную, вибротерапия становится не столь эффективной, какой могла бы быть.

Задача

Необходимо разработать вибромассажер, который сможет определять резонансную частоту определённой части тела человека, после чего проводить вибростимуляцию на этой частоте.

Разрабатываемое устройство

Разрабатываемый вибромассажер должен определять резонансную частоту колебания определенного участка тела. Определить резонансную частоту можно следующим образом. Воздействовать на участок тела разными частотами и отмечать возникающий при этом отклик, при этом можно получить зависимости амплитуды реакции участка тела от подаваемой частоты. Частоты, при подаче которых амплитуда данного участка тела будет максимальна, и будут резонансными частотами.

Реализовать такую систему можно, например, используя:

- микросхему MPU 6050 – модуль 3-осевого гироскопа и акселерометра GY-521 или пьезоэлектрический акселерометр;
- платы из семейства Arduino;
- вибромотор с регулируемой частотой 10–100 Гц.

На рисунке представлен один из возможных вариантов конструкции предлагаемого вибромассажера. На один конец жесткой пластины при-

крепляем пьезоэлектрический акселерометр или микросхему MPU 6050, а на другой конец – вибромотор.

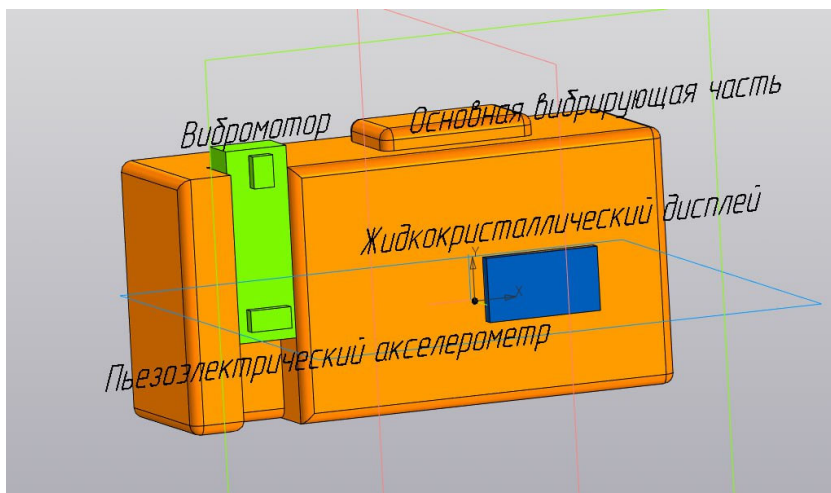


Рис. 1. Схема вибромассажера

Принцип работы

Конец пластины, на котором расположен электромотор, подносится к телу пациента. Далее, воздействуя вибрацией различных частот на определенную часть тела человека, происходит измерение отклика (биологической обратной связи) пьезоэлектрическим акселерометром или микросхемой MPU 6050, расположенной на противоположном конце. Частоты, на которых амплитуда колебаний будет максимальной, будут являться собственными, или резонансными частотами данной части тела. Можно предположить, что, настроив вибромассажёр на данные частоты, будет получен максимально полезный лечебный эффект. Подстройка основного вибромотора под определенную резонансную частоту может осуществляться в автономном режиме.

Вывод

В настоящее время существуют различные модификации вибромассажеров, недостатком которых является невозможность выделения резонансной частоты. В данной статье рассмотрена концепция создания вибромассажера, настраиваемого на резонансную частоту участка тела человека, и обоснована актуальность его разработки. Разрабатываемый

вибромассажер будет использовать принцип обратной биологической связи, выделяя резонансную частоту, что позволит использовать ее эффективно и обеспечит индивидуальный подход к каждому человеку при проведении вибромассажа.

Планируется разработать и апробировать аппаратуру, реализующую адресную пространственную вибростимуляцию физиологически активных поверхностных зон тела; изготовить эргономичные беспроводные датчики и программные средства, количественно измеряющие энергетические и векторные виброхарактеристики в приповерхностных зонах тела; количественно измерить взаимодействие виброчастот, синхронно вкачиваемых в различные зоны; выявить факторы взаимогашения и суммирования всех энергетических вибропараметров. Новые закономерности трансформации механической виброэнергии в теле пациента создают основу для управляемых результативных физиотерапевтических и медикореабилитационных методов.

Список использованных источников и литературы

1. Машанский, В. Ф. Медико-биологические основы вибротерапии / В. Ф. Машанский, И. М. Рабинович. – Ленинград : Знание, 1990. – 16 с.
2. Шмидт, Р. Физиология человека / Р. Шмидт, Г. Тевс. – Москва : Мир, 1996. – 361 с.
3. Мусхешвили, Н. Л. О взаимодействии биологических систем посредством резонансной передачи возбуждения / Н. Л. Мусхешвили, В. М. Сергеев // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 251 – С. 233–235.
4. Креймер, А. Я. Вибрация как лечебный фактор / А. Я. Креймер. – Томск : Том. ун-т, 1972. – 260 с.
5. Креймер, А. Я. Вибрационный массаж при заболеваниях нервной системы / А. Я. Креймер. – Томск : Том. ун-т, 1988. – 319с.
6. Романов, С. Н. Биологическое действие механических колебаний. – Ленинград : Наука. Ленингр. отд-ние, 1983. – 209 с.
7. Сагайдак, Д. И. Персонифицированное вибростимулирование – здоровье для всех / Д. И. Сагайдак // Здоровье для всех : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 10-летию факультета организации здорового образа жизни, Пинск, 18–19 мая 2017 г. – Пинск : Полесский гос. ун-т, 2017. – С. 184–198. – EDN XAVPGZ.

G. S. Pesterev^{1, ✉}, student

*A. R. Mukhametzyanova*², student

*S. B. Egorkina*², DSc in medicine, assoc. prof.

E-mail: grishap2018@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

The Concept of Creating a Vibration Massager Tuned to the Resonant Frequency of a Part of the Human Body

This article discusses the proposed mechanism of the effect of vibrations on the human body. The goal of the project is to theoretically substantiate the idea of creating a vibration massager that ensures the selection of a resonant frequency for certain areas of the body during operation. The operation of the device will be based on the principle of biological feedback - a connection in which biological feedback is established with the body based on changes in various parameters (pulse wave, muscle strength, blood pressure).

Keywords: biofeedback, vibration, vibration massager, resonant frequency.

УДК 620.179.162

А. В. Платунов, канд. техн. наук, доц.*П. С. Корепанов* ✉, студентE-mail: korepanoff2002@gmail.comИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

О возможности ультразвукового контроля нарушений сплошности капролона эхо-методом

Исследованы физические и акустические свойства полиамида-6 блочного (капролона) с целью оценки возможности дальнейшего контроля его сплошности ультразвуковым эхо-методом. Проведены измерения плотности, скорости распространения продольной волны; рассчитан коэффициент затухания.

Ключевые слова: ультразвуковая дефектоскопия, полимерные материалы, полиамид-6 блочный, капролон, акустические свойства, скорость звука, затухание.

Введение

Полиамид-6 блочный (ПА-6 блочный) или капролон – высокомолекулярный конструкционный полимер, обладающий следующими физическими характеристиками: высокие механическая прочность, твердость и износостойкость, малая плотность, низкий коэффициент трения. Для сравнения в табл. 1 приведены физические и механические свойства капролона и металлов [1].

Таблица 1. Физические и механические свойства материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа
Сталь	7700÷7900	210	300÷785
Латунь Л70	8500	100	300÷350
Алюминий	2710	71	100÷120
Капролон	1150÷1160	2÷4	80÷100

Низкая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость позволяют изготавливать из капролона кольца, втулки, подшипники и прочие элементы взамен алюминиевым, бронзовым и латунным.

С ростом спроса на капролон появляется потребность его контроля на наличие дефектов различного типа. В технических условиях приводится лишь разрушающий метод контроля, при котором выбранный образец разрезают и считают количество пор на единицу длины.

Степень пригодности капролона для производства должна контролироваться неразрушающими методами. Ультразвуковой контроль в данном случае является наиболее предпочтительным ввиду своей универсальности и возможности его проведения без разрушения образцов, он широко применяется не только для контроля металлов [2, 3], но и композитов [4], графитов [5] и др. Однако перед началом применения ультразвукового контроля необходимо оценить контролепригодность объекта, провести исследования акустических и физических свойств материала, что и является целью данной работы.

Методы и материалы

В качестве образцов исследованы блоки капролона размерами $150 \times 100 \times 58$ мм (образец № 1) и $150 \times 45 \times 39$ мм (образец № 2). В образце № 1 был изготовлен искусственный отражатель в виде бокового цилиндрического отверстия диаметром 1 мм, при этом расстояние от поверхности до БЦО с одной стороны составляло 34,5 мм, а с другой – 65,5 мм.

Излучение и прием ультразвуковой волны для определения скорости продольной ультразвуковой волны и коэффициента затухания осуществлялись с помощью дефектоскопа УДС2-52 «ЗОНД-2» (рис. 1, а) и прямого пьезоэлектрического преобразователя П111-2,5-12. Данный дефектоскоп позволяет создавать импульс возбуждения амплитудой до 480 В, что крайне важно при контроле материалов с высоким коэффициентом затухания; имеет дискретность установки скорости звука 1 м/с, коэффициент усиления от 0 до 120 дБ и погрешность измерения усиления ± 2 дБ, также имеется функция автоматического определения скорости волны.

Определение плотности капролона производилось методом гидростатического взвешивания посредством аналитических весов AND HR251AZG (рис. 1, б). Весы относятся к первому классу точности и способны проводить автоматическую калибровку с помощью встроенной калибровочной массы. Имеют пределы взвешивания 61 г/252 г с дискретностью 0,1 мг/1 мг. Весы оснащены поддонным крюком, позволяющим производить подвешивание измеряемых образцов.

Метод гидростатического взвешивания основан на измерении массы m_1 исследуемого образца сначала в воздушной среде, а затем массы m_2 образца в жидкости с известной плотностью. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода, плотность которой при темпера-

туре $t = 24^\circ\text{C}$ равна $\rho_{\text{вод}} = 997,33 \text{ кг/м}^3$. Итоговая формула (1) для расчета плотности капролона представлена ниже:

$$\rho_{\text{кап}} = \frac{m_1 \rho_{\text{вод}} - m_2 \rho_{\text{воз}}}{m_1 - m_2}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{воз}}$, $\rho_{\text{вод}}$ и $\rho_{\text{кап}}$ – плотности воздуха, воды и капролона соответственно, кг/м^3 .



а



б

Рис. 1. Используемые приборы: дефектоскоп УДС2-52 «ЗОНД-2» (а); аналитические весы AND HR251AZG (б)

Перед проведением акустических измерений была произведена настройка глубиномера дефектоскопа УДС2-52 «ЗОНД-2» на стандартном образце СО-2 с целью определения времени задержки волны в протекторе преобразователя. Для измеренного значения скорости был рассчитан доверительный интервал ΔC_l (95 %) по формуле (2):

$$\Delta C_l = t_{0,95,k} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{l,i} - \overline{C_l})^2}{n(n-1)}}, \quad (2)$$

где $C_{l,i}$ – скорость продольной ультразвуковой волны в объекте при i -м измерении, м/с; $\overline{C_l}$ – среднее арифметическое значение скорости при n измерениях, м/с; $t_{0,95,k}$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95 % и k степеней свободы.

Определение коэффициента затухания осуществлялось посредством измерения амплитуды первых двух, а там, где это возможно, трех донных импульсов. Измеряя амплитуду донных импульсов разного порядка, можем получить их отношение [6], из которого выразим коэффициент затухания:

$$\delta = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2} - \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1} = \frac{\frac{\Delta U}{8,69} - \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_2 - r_1}, \tag{3}$$

где U_1 и U_2 – амплитуды донных импульсов разного порядка, В; r_1 и r_2 – расстояния, проходимые волной в образце ($r_2 > r_1$), м.

Были измерены амплитуды сигналов от БЦО в капролоне U_K диаметром 1 мм на глубинах 34,5 мм и 65,5 мм и на стандартном образце СО-2 U_{CO} диаметром 6 мм на глубине 44 мм и найдена разность между ними в децибелах (дБ). Для сравнения было рассчитано теоретическое значение исходя из формулы акустического тракта [7] для цилиндрического отражателя:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{S}{2\lambda} \sqrt{\frac{d}{2r^3}} e^{-2\delta r}, \tag{4}$$

где A – амплитуда сигнала, отраженного от дефекта, В; A_0 – амплитуда зондирующего импульса, В; S – площадь излучателя, м²; λ – длина волны, м; d – диаметр цилиндрического отражателя, м.

Результаты и их обсуждение

В результате проведения экспериментов были получены данные, которые представлены в табл. 2. В этой же таблице приведены значения измеряемых величин из открытых источников для сравнения.

Таблица 2. Результаты эксперимента и их сравнение с известными данными

Плотность капролона ρ		
экспериментальная, $\rho_{\text{эксп}}$, кг/м ³		данные из литературы, $\rho_{\text{табл}}$, кг/м ³
1159,3		1150,0÷1160,0
№ образца, толщина, мм	Скорость продольной ультразвуковой волны C_l	
	экспериментальная	данные из литературы
	$\overline{C_l} \pm \Delta C_l$, м/с	$C_{l,\text{табл}}$, м/с
№ 1, 58	2789,5 $\pm$ 6,2	2787
№ 2, 39	2785,0 $\pm$ 5,4	
№ 2, 45	2744,8 $\pm$ 3,9	
Общая	2777,5 $\pm$ 8,4	
Коэффициент затухания δ на частоте 2,5 МГц		
$\delta \pm \Delta\delta$, Нп/м		$\delta_{\text{табл}}$, Нп/м
40,5 $\pm$ 0,6		—

Из табл. 2 видно, что экспериментально измеренная плотность капролона соответствует пределам, указанным в технических условиях.

Скорость варьируется на одном и том же образце (№ 2) более чем на 40 м/с в зависимости от направления прозвучивания, что может свидетельствовать о наличии анизотропии акустических свойств. Существование такой дисперсии скорости может быть обусловлено наличием релаксационных процессов, происходящих в результате различных типов молекулярного движения [8].

По результатам эксперимента коэффициент затухания на частоте 2,5 МГц составил $\delta = 40,5$ Нп/м, однако данных по коэффициенту затухания в капролоне в открытых источниках найти не удалось. Так, коэффициент затухания в капролоне значительно выше, чем в стали ($\delta_{ст} = 0,1 \div 10$), в 2–3 раза выше, чем в оргстекле ($\delta_{орг} = 20 \div 30$), и сильно ниже, чем во фторопласте ($\delta_{фт} = 160$) [9].

Довольно высокий коэффициент затухания присущ многим полимерам и обуславливается поглощением в полимерной матрице и рассеянием на углеродных волокнах. Поглощение происходит из-за перехода энергии ультразвуковых волн в колебательную и вращательную энергию полимерных молекулярных цепочек. Особенности межмолекулярного взаимодействия и наличие длинных молекулярных цепей приводят к появлению релаксационных процессов, что, в свою очередь, отражается в виде высокого коэффициента затухания и дисперсии скорости ультразвуковой волны в капролоне [8].

Амплитуды сигналов от БЦО в образце из капролона относительно опорного уровня, полученного от БЦО диаметром 6 мм на глубине 44 мм в стальном образце СО-2, показаны в табл. 3 и отличаются от расчетных, полученных по формулам акустического тракта (6) не более 1,3 дБ, что ниже инструментальной погрешности дефектоскопа.

Таблица 3. Отношение амплитуд сигналов от дефектов в стали и капролоне

Толщина капролона / стали, мм	Экспериментальные	Теоретические
	$U_{co} - U_k$, дБ	$20 \lg \frac{A_{co}}{A_k}$, дБ
34,5 / 44	20,8	22,1
65,5 / 44	52,0	52,3

Заключение

Проведенное исследование показало возможность применения ультразвукового эхо-метода для контроля сплошности образцов капролона при использовании пьезоэлектрических преобразователей с частотой 2,5 МГц. Определена плотность материала, исследованы скорость и затухание продольных волн в материале, отмечена анизотропия акустических

свойств. Показана возможность выявления дефектов, эквивалентных БЦО диаметром 1 мм в капролоне. Результаты расчета акустического тракта для указанного выше отражателя показали близкие значения с полученными экспериментально.

Список использованных источников и литературы

1. *Лившиц, Б. Г.* Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Липецкий. – Москва : Металлургия, 1980. – 320 с.
2. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С.Б. Барабанова, В. Л. Кожемякин, С. И. Кабанов // Дефектоскопия. – 1997. – № 10. – С. 79–84. – EDN MOZLLV.
3. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
4. *Стрижак, В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 5–15. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. – EDN NZFFOP.
5. *Богдан, О. П.* Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / О. П. Богдан, А. В. Блинова, Л. А. Денисов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – № 2 (27). – С. 97–105. – EDN HMAOQ.
6. Ультразвуковой контроль. Физические основы : учеб. пособие для студентов вузов и профессиональной подготовки специалистов в области неразрушающего контроля / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, О. П. Богдан, А. В. Платунов // Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2022. – 128 с.
7. *Кретов, Е. Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – Изд. 4-е, перераб. – Санкт Петербург : СВЕН, 2014. – 312 с.
8. *Карабутов, А. А.* Локальные соотношения Крамерса – Кронига для коэффициента затухания и фазовой скорости продольных ультразвуковых волн в полимерных композитах / А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова, Ю. Г. Соколова // Акустический журнал. – 2019. – № 2 (65). – С. 182–189. – EDN YYEMGD.
9. *Ермолов, И. Н.* Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – Москва : Машиностроение, 2004. – 864 с.

A. V. Platonov, CSc in engineering, assoc. prof.

P. S. Korepanov ✉, student

E-mail: korepanoff2002@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

On the Possibility of Ultrasonic Testing of Caprolon Continuity Violations by Echo Method

The physical and acoustic properties of bulk polyamide-6 (caprolon) have been investigated in order to assess the possibility of further monitoring of its continuity by the ultrasonic echo method. The density and velocity of propagation of the longitudinal wave were measured; the attenuation coefficient was calculated.

Keywords: ultrasonic flaw detection, polymer materials, bulk polyamide-6, caprolon, acoustic properties, sound velocity, attenuation.

УДК 539.3.000

Е. В. Савинова, ст. преподаватель

E-mail: slenax@yandex.ru

Самарский государственный технический университет
Самара, Россия

Сравнительный анализ результатов расчетов задачи термоэлектроупругости для аксиально поляризованной круглой пластины

В статье сравниваются результаты расчетов, выполненных аналитическим и численным методами для оценки напряженно-деформированного состояния круглой сплошной шарнирно закрепленной аксиально поляризованной пьезокерамической пластины, находящейся под действием нестационарной осесимметричной температурной нагрузки.

Ключевые слова: пьезокерамическая пластина, термоэлектроупругость, связанная задача.

Введение

Современные измерительные приборы и датчики, использующие пьезокерамические элементы, функционируют благодаря свойству пьезокерамики – способности связывать между собой температурные, электрические и механические поля. При изменении одного из воздействий, например температуры, или электрического поля, или механического напряжения, в пьезокерамическом материале происходит изменение в двух других параметрах. Эти эффекты описываются сложными математическими моделями, учитывающими нелинейные взаимосвязи между параметрами [1, 2].

Для более точного описания поведения пьезокерамических устройств, особенно в динамических режимах, возникает необходимость построения трехмерных моделей, учитывающих нестационарные процессы.

Новое замкнутое аналитическое решение для круглой пьезокерамической пластины, находящейся под воздействием нестационарной осесимметричной температурной нагрузки, представляет значительный шаг вперед в этом направлении.

Методы и материалы

Сплошная пластина, выполненная из пьезокерамического состава, в цилиндрической системе координат (r_*, θ, z_*) занимает область Ω : $\{0 \leq r_* \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq z_* \leq h^*\}$. Исследуется работа элемента при заданной температуре внешней среды $\mathcal{G}^*$ на нижней плоскости для случая, при котором происходит изменение температуры $\omega_1^*(r_*, t_*)$ на верхней лицевой и на цилиндрической $\omega_2^*(t_*)$ поверхностях. Верхняя и нижняя лицевые поверхности пластины электродированы, подключены к измерительному прибору с большим входным сопротивлением с целью определения разности потенциалов $V(t_*)$. Нижняя поверхность пластины заземлена. Закрепление пластины по контуру принято шарнирное. Расчетная схема представлена на рис. 1.

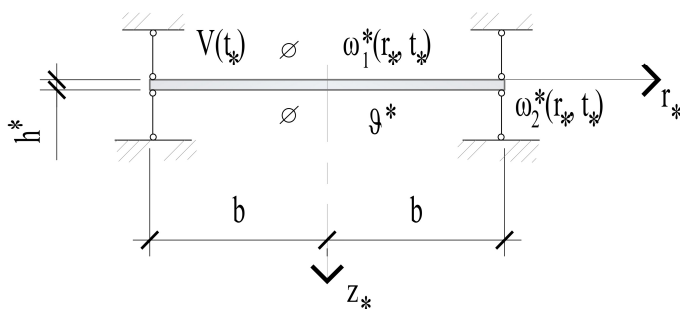


Рис. 1. Расчетная схема к задаче

Математическая формулировка включает систему дифференциальных уравнений термоэлектроупругости с соответствующими краевыми условиями; в задаче изучается поведение электроупругого материала, деформируемого под воздействием температуры и электрического поля, при этом используется некоторое упрощение, связанное с пренебрежением инерционными эффектами [3].

Решение задачи

Для пластины с заданными геометрическими размерами (радиус пластины $b = 14 \times 10^{-3}$ м, высота пластины в размерной форме $h^* = 1,5 \times 10^{-3}$ м) из пьезокерамического состава PZT-4 результаты замкнутого решения построенной математической модели, полученные анали-

тическим расчётом в [4] (рис. 3, *а*), сравниваются с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов (МКЭ) (рис. 3, *б*). Во внимание принимаются различные моменты времени (при $t_{\max}^* = 0,1$ с) до достижения максимальной осесимметричной температурной нагрузки 100 °С на верхней лицевой поверхности и заданной температуры окружающей среды 20 °С.

Построенная математическая модель [4] и расчет МКЭ показывают, что с некоторой погрешностью результаты расчета изменения температурного поля $\Theta^*(0, z, t)$, °С, в теле пластины по аксиальной координате совпадают (разница в полученных результатах составляет от 2 до 7 % в зависимости от времени прогрева) при установившемся температурном поле.

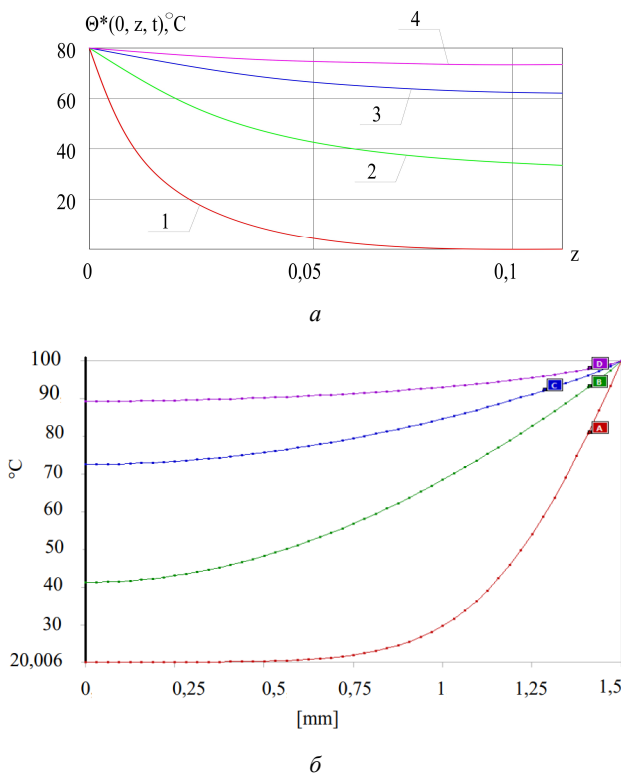


Рис. 2. Изменение температурного поля $\Theta^*(0, z, t)$, °С, по высоте пластины: *а* – 1 – $t = t_{\max}$; 2 – $t = 10t_{\max}$; 3 – $t = 30t_{\max}$; 4 – $t = 100t_{\max}$; *з* – безразмерная координата по высоте пластины; *б* – (А – при $t = t_{\max}$, В – при $t = 10t_{\max}$, С – при $t = 30t_{\max}$, D – при $t = 100t_{\max}$)

При исследовании нестационарных тепловых процессов для оценки напряженно-деформированного состояния пластины разница в результатах для напряжений $\sigma_{rr}(r, 0, t)$ вдоль радиальной координаты составляет до 50 % в начальный момент времени (рис. 3), что объясняется отсутствием возможности при использовании МКЭ учесть скорость распространения температурного поля в электроупругой системе.

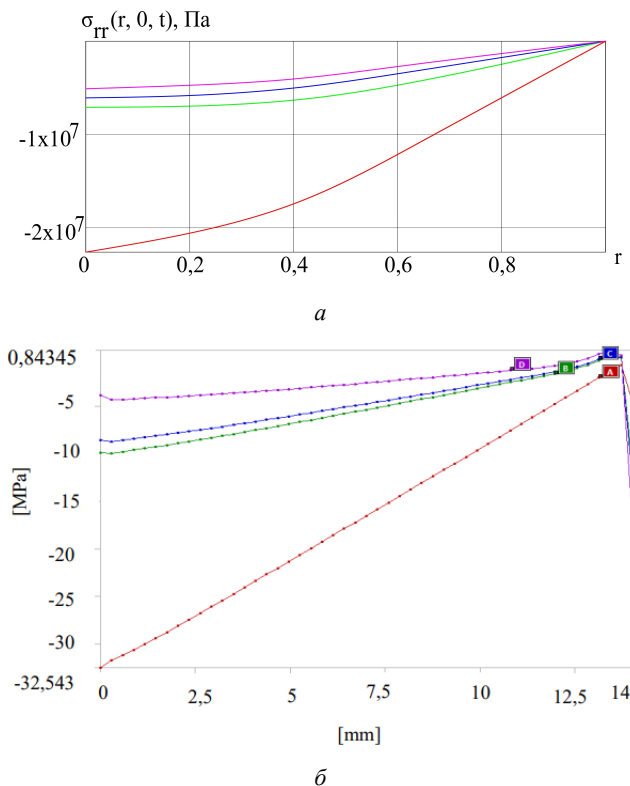


Рис. 3. Изменение напряжений по радиальной координате в различные моменты времени: *a* – по результатам аналитического расчёта; *б* – с помощью МКЭ (условные обозначения: красная линия *A* – при $t = t_{\max}$, зелёная *B* – при $t = 10t_{\max}$, синяя *C* – при $t = 30t_{\max}$, сиреневая *D* – при $t = 100t_{\max}$)

Вывод

На основании сравнения полученных результатов можно сделать вывод, что при установившейся температурной нагрузке (рис. 2) про-

грев пластины по данным аналитического и численного расчетов совпадает с небольшой погрешностью.

В связанных задачах для оценки взаимодействия между температурой и напряжениями методом конечных элементов в случаях отсутствия адаптации для подобных задач возможно получение некорректных результатов взаимодействия.

Список использованных источников и литературы

1. *Ионов, Б. П.* Спектрально-статистический подход к бесконтактному измерению температуры / Б. П. Ионов, А. Б. Ионов // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 9–12. – EDN JWYALN
2. *Казарян, А. А.* Тонкопленочный датчик давления и температуры / А. А. Казарян // Датчики и системы. – 2016. – № 3 (201). – С. 50–56. – EDN XHFKCH.
3. *Шляхин, Д. А.* Динамическая задача термоэлектроупругости для круглой жёстко закреплённой пластины / Д. А. Шляхин, Е. В. Савинова, В. А. Юрин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 1 (50). – С. 3–16. – DOI 10.24866/2227-6858/2022-1/3-16. – EDN QUVZUZ.
4. *Шляхин, Д. А.* Связанная нестационарная осесимметричная задача термоэлектроупругости для круглой пьезокерамической шарнирно закреплённой пластины / Д. А. Шляхин, Е. В. Савинова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 159–178. – DOI 10.14498/vsgtu1959. – EDN WXLOUH.

E. V. Savinova, senior lecturer

E-mail: slenax@yandex.ru

Samara State Technical University
Samara, Russia

Comparative Analysis of the Calculation Results of the Thermoelectroelasticity Problem for an Axially Polarized Circular Plate

The article compares the results of calculations performed by analytical and numerical methods to assess the stress-strain state of a round solid pivotally mounted axially polarized piezoceramic plate under the action of an unsteady axisymmetric temperature load.

Keywords: piezoceramic plate, thermoelectroelasticity, coupled problem.

УДК 620.179.14

А. Н. Сташков ✉, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.

А. П. Ничипурук, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.

А. М. Матосян, Н. В. Гордеев, инж.-исслед.

М. С. Стенина, науч. сотр.

Е-mail: stashkov@imp.uran.ru

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН
Екатеринбург, Россия

Методика и аппаратура для задач магнитного неразрушающего контроля одноосных механических напряжений в ферромагнетиках*

Разработаны методика и аппаратура для оценки одноосных механических напряжений в ферромагнетиках на основании экспериментального определения критических полей смещения 90-градусных доменных границ. Согласно методике, возможно количественно определить приложенные механические напряжения, что может быть применено для технической диагностики объектов из ферромагнитных материалов с разным знаком магнитострикции, в том числе никелевых покрытий на неферромагнитном основании.

Ключевые слова: железо, никель, сталь, деформация, механические напряжения, магнитный контроль.

Введение

На сегодняшний день в России и мире многими исследователями решается задача разработки неразрушающих методик и аппаратуры для контроля механических напряжений в стальных конструкциях и деталях. Для практического применения наиболее перспективны акустические [1–2], рентгеновские [3] и магнитные (электромагнитные) [4–5] методики контроля. Среди магнитных хорошо известен коэрцитиметрический метод контроля одноосных механических напряжений и метод шумов Баркгаузена [6]. Последний из-за скин-эффекта можно отнести к поверхностным. Коэрцитиметрический метод позволяет проводить контроль напряжений в деталях с их поверхности до глубин в несколько десятков миллиметров (в зависимости от размеров приставных преобра-

© Сташков А. Н., Ничипурук А. П., Матосян А. М., Гордеев Н. В., Стенина М. С., 2025

* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

зователей). Несмотря на свою простоту и большое разнообразие на рынке приборов-коэрцитиметров, практическое применение метода осложнено в силу необходимости проведения предварительной градуировки приборов на образцах из той марки стали, на которой предполагается проводить контроль.

Цель данной работы заключается в разработке альтернативной методики и аппаратуры для контроля механических одноосных напряжений по магнитным параметрам.

Методика оценки механических напряжений

Вышеперечисленных недостатков лишена методика неразрушающего контроля механических напряжений, предложенная коллективом авторов из Института физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН [7–9]. Ее особенностью является отсутствие необходимости проведения предварительной калибровки применяемой магнитометрической аппаратуры на образцах из той марки стали, на которой предполагается проводить контроль. Для количественного определения механических напряжений требуется измерить полевую зависимость дифференциальной или обратимой магнитной проницаемости. В качестве примера на рис. 1 приведены такие кривые для технически чистого железа (рис. 1, *а*) и никеля (рис. 1, *б*). Из рис. 1 видно, что, в отличие от исходных кривых для недеформированных образцов, для упруго сжатого железа и растянутого никеля на кривых наблюдаются особенности в виде дополнительных максимумов или перегибов. Причиной появления особенностей на кривых является наличие в образцах магнитной текстуры типа «легкая плоскость», которая влияет на процессы перемагничивания и необратимое смещение в основном 90-градусных доменных границ (ДГ). В силу того, что при действии напряжений положение среднего максимума остается практически неизменным (рис. 1), возникновение крайних максимумов и связано с 90-градусными ДГ, чувствительных к напряжениям. На рис. 2, *а* представлены кривые для пластически деформированного образца из низкоуглеродистой стали 3 без приложения дополнительной нагрузки и во время сжатия. Из рис. 2, *а* видно, что чем больше приложенные напряжения, тем дальше друг от друга крайние максимумы. Поля этих максимумов могут быть определены после математической обработки кривых. На рис. 2, *б* приведен результат аппроксимации функциями псевдо-Фойгта. Аппроксимация проводилась так, чтобы исходную кривую представить в виде суммы трех кривых с единственными максимумами. Левая и правая кривые имеют максимумы в полях H_1 и H_2 , значения которых были определены для всех нагрузок, рассчитаны средние арифметические H_{cp} этих полей. Расчет

компоненты тензора механических напряжений (в МПа) в ферромагнетике проводится по формуле

$$\sigma_{xx}^{\text{расч}} = -\frac{2\mu_0 H_{\text{ср}} M_S}{3c\lambda_{xyz}}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $H_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое абсолютных значений полей H_1 и H_2 ; M_S – намагниченность насыщения, c – константа, зависящая от типа кристаллической решетки (0,82 для ОЦК и 1 для ГЦК), λ_{xyz} – константа магнитострикции в кристаллографическом направлении легкого намагничивания (λ_{100} для железа и сталей и λ_{111} для никеля).

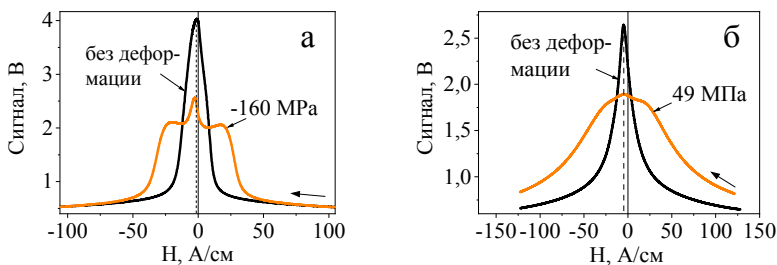


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя, пропорциональные обратной магнитной проницаемости: для технически чистого железа (а) и никеля (б)

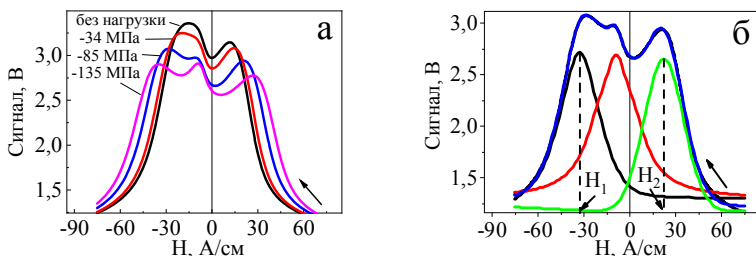


Рис. 2. Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя для пластически-деформированной стали Ст3 ($\delta = 3,9\%$) без внешней нагрузки и при действии сжимающих нагрузок (а) и результат аппроксимации одной из кривой (б)

Аппаратура для контроля механических напряжений

Для применения в полевых условиях разработанной методики количественной оценки механических напряжений в ферромагнитных деталях и изделиях по магнитным параметрам разработаны и изготовлены первичный преобразователь и блок измерения с программным обеспечением. Ключевым звеном мобильного магнитометрического комплекса (рис. 3, *а*) является первичный преобразователь, в состав которого входят: приставной электромагнит (ПЭМ), система из подмагничивающей и измерительной катушек в межполюсном пространстве ПЭМ, датчик Холла (рис. 3, *б*). Автоматизация и автономная работа прибора осуществлена благодаря использованию платы АЦП/ЦАП NI USB-6211 и персонального компьютера. Управляющая программа написана на языке графического программирования NI LabView 2013.

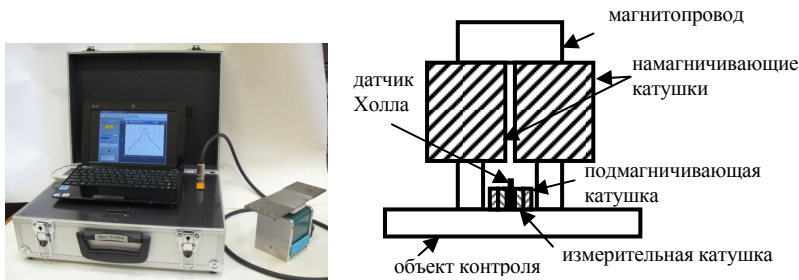


Рис. 3. Внешний вид магнитометрического комплекса (*а*) и схема первичного преобразователя (*б*)

Проверка мобильного магнитометрического комплекса была проведена на пластинах из стали 20. Пластины были изготовлены путем фрезерования и шлифовки с последующим низкотемпературным отжигом для снятия внутренних напряжений. Прикладываемая к испытуемому образцу нагрузка фиксировалась с помощью аттестованного динамометра. Размер образцов составлял $200 \times 56 \times 5$ мм³. Измерялись полевые зависимости сигнала измерительной катушки. Перемагничивание пластин происходило с частотой $5 \cdot 10^{-3}$ Гц (цикл измерения 100 секунд). Подмагничивание осуществлялось переменным магнитным полем с частотой 1 кГц и амплитудой много меньше поля коэрцитивной силы. Полученные экспериментальные кривые также были аппроксимированы с помощью функций псевдо-Фойгта, определялись поля H_1 и H_2 и рассчитывались макронапряжения $\sigma_{xx}^{\text{расч}}$ по формуле (1). Результаты пред-

ставлены в таблице. Из сравнения рассчитанных $\sigma_{xx}^{\text{расч}}$ и приложенных напряжений σ_{xx} видно, что погрешность определения напряжений не более 10 %.

Результаты измерений на пластинах из стали 20

Нагрузка, кгс	H_1 , А/см	H_2 , А/см	$ \sigma_{xx}^{\text{расч}} $, МПа	$ \sigma_{xx} $, МПа
2000	7,0	-11,6	73,5	72,0
3000	12,6	-13,4	110,0	101,0

Выводы

Показаны возможности разработанной методики и аппаратуры для оценки механических напряжений в деталях и изделиях из ферромагнитных материалов. При помощи разработанной переносной магнитометрической системы возможно проводить контроль механических напряжений в локальных местах массивных стальных конструкций.

Список использованных источников и литературы

1. Muravyev, V. V. Ultrasonic in-process control of residual stresses in locomotive tires / V. V. Muravyev, L. V. Volkova, M. A. Lapchenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, no 5. – Pp. 259-271. – EDN: UFBXTV. <https://doi.org/10.1134/S1061830915050046>.
2. Ultrasonic laser diagnostics of residual stresses / M. Ya. Marusina, A. V. Fedorov, V. A. Bychenok, I. V. Berkutov // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 57. – Pp. 1154-1159. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0595-4>.
3. Prevéy, P. S. Current applications of X-ray diffraction residual stress measurement / P. S. Prevéy // Developments in Materials Characterization Technologies, eds. G. Vander Voort and J. Friel, ASM International, Materials Park, OH. – 1996. – Pp. 103-110. – URL: https://users.encs.concordia.ca/~tmg/images/1/10/Current_applications_of_X-ray_diffraction_residual_stress_measurement.pdf (дата обращения: 25.09.2024)
4. Micro-magnetic evaluation of microresidual stresses of the 2nd and 3rd order / I. Altpeter, G. Dobmann, M. Kröning, M. Rabung, S. Szielasko // NDT & E International. – 2009. – Vol. 42 (Iss. 4). – Pp. 283-290. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.007>.
5. Eddy current residual stress profiling in surface-treated engine alloys / B. A. Abu-Nabah, Y. Feng, W. T. Hassan, M. P. Blodgett, P. B. Nagy // Nondestructive Testing. Evaluation. – 2009. – Vol. 24 (Iss. 1-2). – Pp. 209-232. – URL: <https://doi.org/10.1080/10589750802245280>.
6. Gauthier, J. Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique / J. Gauthier, T. W. Krause, D. L. Atherton // NDT & E International. – 1998. – Vol. 31 (Iss. 1). – Pp. 23-31. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(97\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(97)00023-6).

7. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires / A. P. Nichipuruk, E. V. Rozenfel'd, M. S. Ogneva, A. N. Stashkov, A. V. Korolev // *Russian Journal of Nondestructive Testing* – 2014 – Vol. 10. – Pp. 18-26. – EDN UFTTSN. <https://doi.org/10.1134/S1061830914100088>.

8. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel / A. N. Stashkov, E. A. Schapova, A. P. Nichipuruk, A. V. Korolev // *NDT & E International*, 2021. – Vol. 118. – Art. no. 102398. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102398>.

9. Magnetic Incremental Permeability of Elastically Deformed Iron and Nickel / A. N. Stashkov, E. A. Schapova, A. P. Nichipuruk, A. V. Stolbovsky // *Journal of nondestructive evaluation*. – 2024. – Vol. 43. – Art. no. 8. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10921-023-01023-y>.

A. N. Stashkov ✉, CSc in engineering, leading researcher

A. P. Nichipuruk, DSc in engineering, chief researcher

A. M. Matosyan, N. V. Gordeev, research engineers

M. S. Stenina, researcher

E-mail: stashkov@imp.uran.ru

M. N. Mikheev Institute of Metal Physics

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Methods and Equipment for Magnetic Non-Destructive Testing of Uniaxial Mechanical Stresses in Ferromagnets

A technique and equipment have been developed for estimating uniaxial mechanical stresses in ferromagnets based on the experimental determination of critical displacement fields of 90-degree domain boundaries. According to the method, it is possible to quantify the applied mechanical stresses, which can be used for technical diagnostics of objects made of ferromagnetic materials with different signs of magnetostriction, including nickel coatings on a non-ferromagnetic base.

Keywords: iron, nickel, steel, deformation, mechanical stress, magnetic testing.

УДК 620.179.16

В. А. Стрижак , канд. техн. наук, доц.*С. А. Мурашов*, канд. техн. наук, доц.E-mail: str@istu.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Сравнение результатов расчета акустического эхо-сигнала крутильной волны в трубе от искусственного отражателя, полученных в аналитической и конечно-элементной моделях*

В работе проведен сравнительный анализ результатов, получаемых в аналитической модели, базирующейся на понятии акустического импеданса, и конечно-элементной модели, реализованной в программной среде COMSOL Multiphysics, при исследовании отражения крутильной волны от искусственного отражателя типа круговой проточки в трубе. Аналитическая модель реализована в программной среде Mathcad и использует частотно-зависимые коэффициенты прозрачности и отражения. Конечно-элементная модель рассчитывает распространение смещений с учетом геометрии и физических свойств материала трубы. Объектом моделирования является фрагмент трубы диаметром 89 мм, толщиной стенки 4 мм с искусственным отражателем. Промоделировано прохождение и отражение крутильной волны через зону с круговой проточкой глубиной 0,7 мм и изменяемой длиной. Расчет аналитической модели быстрее в сотни раз, а результаты совпадают с точностью 5 %.

Ключевые слова: крутильные волны, трубы, акустический волноводный контроль, акустический импеданс, метод конечных элементов, COMSOL Multiphysics, Mathcad.

Введение

Волноводный контроль позволяет проводить контроль труб без сканирования и использует методику прозвучивания, где низкочастотный импульс запускается с торца или из заданной позиции длинномерного объекта, распространяется по телу и в виде отраженных эхо-импульсов от несплошностей и от противоположного торца возвращается обратно

© Стрижак В. А., Мурашов С. А., 2025

* Работа выполнена в рамках договора № ПМИКД-1-24/М от 8.04.2024 г. «Разработка научно-методического обеспечения прибора волноводного мониторинга технического состояния активов опасных производственных объектов».

и регистрируется [1–7]. К длинномерным объектам относятся образцы с поперечными размерами, многократно меньшими их длины [8–12]. Эхо-сигнал, отраженный от дефекта, меняется не только в зависимости от глубины дефекта, но и от его длины [13, 14].

Для расчета амплитуды сигналов, отраженных от дефекта, используют аналитическую модель, базирующуюся на известных зависимостях прохождения акустического импульса через границу с иными акустическими свойствами [14]. Аналитическая модель рассчитывается существенно быстрее, но не учитывает особенностей геометрии и формы объекта контроля, его подробных физических свойств.

В программной среде COMSOL Multiphysics возможен расчет прохождения акустического импульса с учетом геометрии (объемная модель) и физических свойств материала [15–18], но ценой значительных вычислительных затрат.

Целью работы является сравнение результатов расчетов аналитической и конечно-элементной моделей, что позволит для некоторого круга задач использовать более скоростной метод получения результатов.

Методы и материалы

В качестве моделируемого объекта выступает металлическая стальная труба наружным диаметром $D = 89$ мм и толщиной стенки $H = 4$ мм с заданными упругими характеристиками материала. Искусственный отражатель (дефект) представлен в виде круговой плоскодонной проточки длиной L от 1 до 50 мм (изменяемый параметр задачи), глубиной $h = 0,7$ мм, без плавного перехода от бездефектной части к дефекту.

Аналитическая модель отражения и прохождения акустического импульса через дефект базируется на представлении участка с перепадом сечения в виде аномалии с измененным акустическим импедансом.

Конечно-элементная модель трубы построена в программной среде COMSOL Multiphysics и, в силу осесимметричности задачи, представлена в виде сегмента трубы с углом раскрытия 5 градусов.

Описание эксперимента

Зондирующий акустический импульс в аналитической модели задан в виде 1 периода синусоиды на временной шкале, состоящей из 2^{17} точек. Расчет произведен с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) в программной среде Mathcad. В качестве результирующего параметра K_A в расчете аналитической модели используется отношение максимума отраженного сигнала U_{m0} к максимуму прошедшего U_{mp} сигнала (относительная амплитуда):

$$K_A = U_{m0} / U_{mp} . \quad (1)$$

В конечно-элементной модели в качестве зондирующего импульса использован набор синтезированных поверхностных касательных смещений. Частота, соответствующая возмущению, составляет 64 кГц. Расчет конечно-элементной модели выполнен на компьютере с двумя процессорами Intel Xeon E5-2630, содержащими по 10 ядер (20 потоков) в каждом, и оперативной памятью 512 ГБ. Время расчета модели для 28 вариантов длин и 11 глубин отражателя составило 72 часа.

В качестве результата расчета выступают сформированные на поверхности модели касательные смещения в момент времени 150 мкс с момента начала симуляции (после взаимодействия импульса крутильной волны с дефектом). Затухание, связанное с диссипативными процессами, в модели отсутствует. Отчет представлен набором из 10 000 точек на внешней образующей трубы, равномерно интерполирующих результат расчета и содержащих координату и значение касательной к поперечному сечению трубы компоненты смещений.

Результаты и их обсуждение

В результате расчета конечно-элементной модели получено значение скорости крутильной волны 3238 м/с. Скорость определяется по смещению максимума касательного возмущения на координатной оси от момента времени 38,7 мкс до 88,7 мкс. Методика соответствует способам, реализуемым на практике при определении скорости акустической волны [18–20].

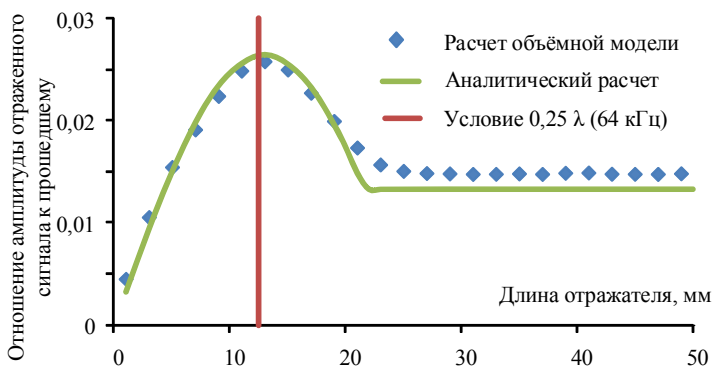


Рис. 1. Результат сравнения разных моделей

Результаты моделирования представлены на рис. 1. Сплошной линией показано измерение относительного значения амплитуды в зависимости от длины отражателя L , полученное в аналитической модели. Отдельными точками показаны результаты расчета конечно-элементной модели. Вертикальная линия демонстрирует положение точки, соответствующей условию резонанса $L = 0,25\lambda$ (λ – длина волны) на частоте зондирующего импульса в 64 кГц. Результаты, полученные разными методами, различаются не более чем на 5 %. Аналогичные результаты получены для глубин проточки $h = 0,1\text{--}2,1$ мм.

Выводы

По сравнению с конечно-элементной моделью, требующей значительных вычислительных затрат, аналитическая модель, описанная частотно-зависимыми коэффициентами отражения и прохождения, показывает свою высокую эффективность. Результаты моделирования осесимметричной задачи в виде круговой проточки на трубе диаметром 89 мм демонстрируют расхождение не более 5 %.

Список использованных источников и литературы

1. Актический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. – Новосибирск : Изд-во Сибир. отд-ния РАН, 2017. – 234 с. – ISBN 978-5-7692-1560-5. – EDN YUHZJR.
2. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В.А. Стрижак, Р.Р. Хасанов, А.С. Хомутов, К.А. Торхов, П.Н. Пушин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.
3. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review / X. Zang, Zh.D. Xu, H. Lu, Ch. Zhu, Zh. Zhang // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2023. – Vol. 206. – Art. no. 105033. – DOI 10.1016/j.ijpvp.2023.105033. – EDN NKWPER.
4. Ultrasonic guided wave testing on pipeline corrosion detection using torsional T(0,1) guided waves / T. Ch. Yung, J S Pang, M N Abdul Hamid L.E. Ooi, W.H. Tan // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. – 2022. – Pp. 9157-9166. – DOI 10.15282/jmes.16.4.2022.01.0725. – EDN VBIJSU.
5. Olisa, S. C. Review of current guided wave ultrasonic testing (GWUT) limitations and future directions / S. C. Olisa, M. A. Khan, A. Starr // Sensors. – 2021. – Vol. 21, no. 3. – Pp. 1-28. – DOI 10.3390/s21030811. – EDN BVCYIB.
6. Applications of linear scanning magnetostrictive transducers (MST) for finding hard-to-detect anomalies in structural components / S. Vinogradov, X. Chen, A. Cobb, Ja. Fisher // Research and Review Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 1, no. 1. – Pp. 1-8. – DOI 10.58286/28141. – EDN EGIHO.

7. *Муравьева, О. В.* Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на многократных отражениях при контроле пруткового проката / О. В. Муравьева, А. Ф. Брестер, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2022. – № 8. – С. 36–51. – DOI 10.31857/S0130308222080048. – EDN BQEKGO.
8. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124. – DOI 10.7868/S032079191506009X. – EDN UWEWFB.
9. *Муравьева, О. В.* Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, С. А. Мурашов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (50). – С. 149–154. – EDN NDKCSD.
10. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 57–66. – EDN HYJVKD.
11. *Муравьева, О. В.* Акустический тракт метода многократных отражений при дефектоскопии линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2013. – № 2. – С. 43–51. – EDN QJGKTJ.
12. *Стрижак, В. А.* Стенд для определения зависимости скорости стержневой волны от температуры в металлических прутках / В. А. Стрижак // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 3 (297). – С. 40–49. – DOI 10.14489/tl.2023.03.pp.040-049. – EDN WMUCGO.
13. Дефектоскопия композитной арматуры акустическим волноводным методом / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, С. С. Мкртчян // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 78–88. – DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-78-88. – EDN ZBAFKH.
14. *Стрижак, В. А.* Искусственный отражатель для настройки дефектоскопа, реализующего акустический волноводный метод контроля композитной арматуры / В. А. Стрижак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 5–15. – DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-5-15. – EDN NZFFOP.
15. *Myshkin, Y. V.* The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes / Y. V. Myshkin, O. V. Muravieva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881, no. 1. – Art. no. 012019. – DOI 10.1088/1742-6596/881/1/012019. – EDN XNSQXZ.
16. *Zhang, Sh.* Research on acoustic reflection characteristics of typical concave body based on COMSOL / Sh. Zhang, X. Sun, Zh. Yao // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2458, no. 1. – Art. no. 012008. – DOI 10.1088/1742-6596/2458/1/012008. – EDN ZCALJF.
17. *Койгеров, А. С.* Моделирование методом конечных элементов устройств на поверхностных акустических волнах с использованием пакета COMSOL / А. С. Койгеров, А. В. Корляков // Микроэлектроника. – 2022. – Т. 51, № 4. – С. 272–282. – DOI 10.31857/S054412692204007X. – EDN HMAZQZ.
18. *Заславский, Ю. М.* О рассеянии рэлеевских и продольных сейсмических волн на локальной неровности грунта / Ю. М. Заславский, В. Ю. Заславский //

Вычислительная механика сплошных сред. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 194–201. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.2.18. – EDN BNKCQC.

19. *Муравьев, В. В.* Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2(29). – С. 71–75. – EDN WAXWNJ.

20. Реализация импульсного метода определения скорости ультразвука с высокой точностью / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, Т. И. Земсков, Г. В. Безрученков, В. В. Сяктерева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 13–19. – DOI 10.22213/2410-9304-2021-2-13-19. – EDN THOPS.

V. A. Strizhak , CSc in engineering, assoc. prof.

S. A. Murashov, CSc in engineering, assoc. prof.

E-mail: str@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Comparison of Results of the Calculation of the Acoustic Echo Signal of a Torsional Wave in a Pipe from an Artificial Reflector Obtained in Analytical and Finite Element Models

The paper presents a comparative analysis of the results obtained in an analytical model based on the concept of acoustic impedance and a finite element model implemented in the COMSOL Multiphysics software environment when studying the reflection of a torsional wave from an artificial reflector of the circular groove type in a pipe. The analytical model is implemented in the Mathcad software environment and uses frequency-dependent coefficients of transparency and reflection. The finite element model calculates the propagation of displacements taking into account the geometry and physical properties of the pipe material. The object of the study is a fragment of a pipe with a diameter of 89 mm, a wall thickness of 4 mm with an artificial reflector. The passage and reflection of a torsional wave through a zone with a circular groove 0.7 mm deep and variable length is modeled. The calculation of the analytical model is hundreds of times faster, and the results match with an accuracy of 5 %.

Keywords: torsional wave, pipes, acoustic guided wave testing, finite element method, acoustic impedance, COMSOL Multiphysics, Mathcad

УДК 534.143*Н. В. Федорова*, мл. науч. сотр.E-mail: fedorovanv@udman.ruУдмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Компьютерное моделирование распространения акустических волн

В работе представлено моделирование излучения и распространения акустических волн в программной среде COMSOL Multiphysics. Показаны некоторые возможности визуализации и графического представления полученных результатов.

Ключевые слова: акустические волны, математическое моделирование, COMSOL Multiphysics.

Введение

Программная среда COMSOL Multiphysics – одна из самых современных и многофункциональных программных платформ для компьютерного моделирования физических задач [1]. Результатам численного моделирования физических задач, в том числе «мультифизических» явлений, посвящены работы в самых разных областях науки и техники [2, 3]. Математическое моделирование сложной системы – это процесс создания и исследования ее упрощенной модели. Визуализация результатов моделирования, с одной стороны, дает возможность проанализировать некоторые свойства и поведение объекта исследования, а с другой стороны, способствует пониманию степени адекватности математической модели реальному процессу.

В работе представлены некоторые возможности визуализации распространения акустической волны и графического представления результатов моделирования с использованием модуля «Акустика» программного пакета COMSOL Multiphysics 6.1».

Постановка задачи

Построенная модель представляет собой сферу радиусом $R = 0,02$ м, наполненную водой (рис. 1). Внутри сферы помещалась полипропиленовая «таблетка» радиусом $r = 0,0075$ м и высотой $h = 0,0025$ м. Со-

гласно заложенным в модель условиям на границе между нижней гранью полипропиленовой таблетки и водой действует переменное давление $p = A \sin(2\pi f_0 t)$, где амплитуда переменного давления $A = 1$ Па, $f_0 = 1$ МГц, длительность импульса $3T$ ($T = 1/f_0$). Время расчета $\Delta t = 13$ мкс выбиралось с учетом скорости распространения волны в полипропилене и воде. Поскольку задача является осесимметричной, моделирование распространения акустической волны проводилось для 2d-задачи (рис. 2).

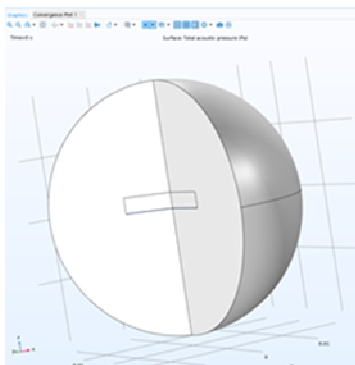


Рис. 1. Модель сферы с водой и полипропиленовой таблеткой

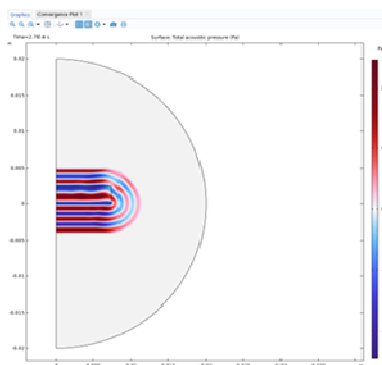


Рис. 2. Визуализация бегущей волны

Визуализация и представление результатов

Под воздействием переменного давления возбуждаются плоские волны, фронт которых видоизменяется с течением времени (рис. 2, 4). По цветовой шкале можно судить об акустическом давлении в любой точке волны в каждый момент времени. Временная зависимость акустического давления в выбранной точке может быть представлена в виде графика (рис. 3). Распределение акустического давления в волне, представленное в виде анимации или стоп-кадров в 3d-варианте (рис. 4), делает представление более наглядным и удобным для дальнейшего анализа модели.

Возможность представления акустического давления вдоль различных кривых или на различных поверхностях может быть полезна для получения, например, диаграммы направленности излучателя. На рис. 5 изображено акустическое давление вдоль сегмента окружности в момент времени $t = 1,3 \cdot 10^{-5}$ с.

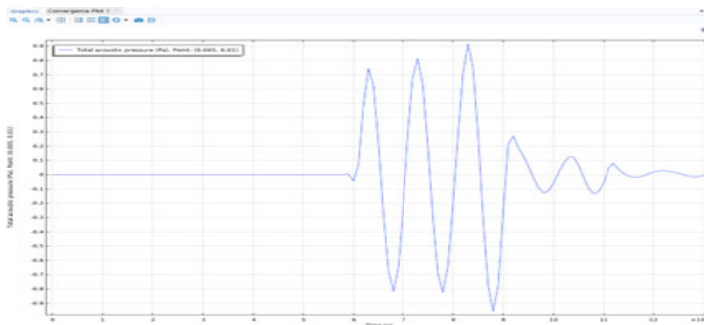
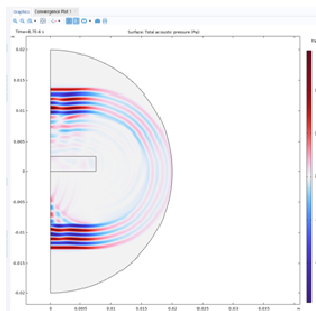
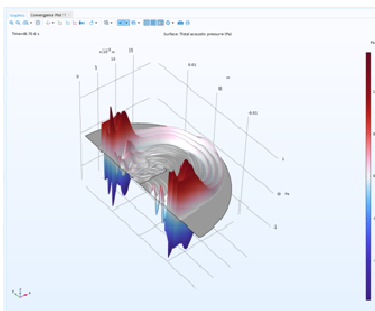


Рис. 3. Зависимость акустического давления от времени в точке (0,005; 0,01)

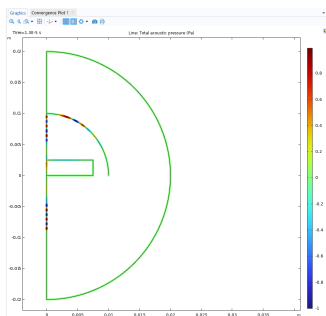


а

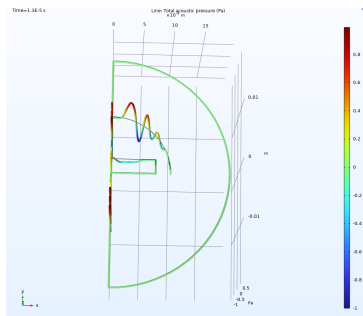


б

Рис. 4. Распределение акустического давления в момент времени $t = 8,7 \cdot 10^{-6}$ с: 2d-изображение (а); 3d-изображение (б)



а



б

Рис. 5. Акустическое давление вдоль сегмента окружности в момент времени $t = 1,3 \cdot 10^{-5}$ с: 2d-изображение (а); 3d-изображение (б)

Выводы

Заложенные в программной среде COMSOL Multiphysics возможности визуализации физических процессов и представления результатов, некоторые из которых показаны выше, являются удобным инструментом для анализа численных моделей исследуемых явлений и являются одним из аргументов при суждении об адекватности модели реальному процессу.

Список использованных источников и литературы

1. Введение в COMSOL Multiphysics. – URL: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (дата обращения: 27.10.2024).
2. Моделирование магнитных, электрических и акустических полей проходного преобразователя для контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. Ф. Башарова // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. С. 16–24. – DOI: 10.1134/S0130308219020027.
3. Дядова, А. В. Моделирование распространения электрических сигналов в сердечной мышце человека с использованием программного пакета COMSOL // Бюллетень сибирской медицины. – 2014. – Т. 13, № 4. – С. 43–46.

N. V. Fedorova, junior researcher

E-mail: fedorovanv@udman.ru

Udmurt Federal Research Center,

Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Computer Simulation of Acoustic Wave Propagation

The paper presents a simulation of the emission and propagation of acoustic waves in the COMSOL Multiphysics software environment. Some possibilities of visualization and graphical representation of the obtained results are shown.

Keywords: acoustic waves, mathematical modeling, COMSOL Multiphysics.

УДК 620.179.16

А. С. Хомутов, аспирант
М. А. Синцов, канд. тех. наук., рук. лаборатории
П. Н. Пушин, аспирант
В. И. Буханов, студент
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Оценка скорости рэлеевских волн в технологическом цикле производства плунжеров*

Представлены результаты экспериментальных исследований возможности ультразвукового контроля упрочненной поверхности плунжеров с применением рэлеевских волн многократных прохождений.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, рэлеевские волны, плунжер.

Введение

Для добычи нефтепродуктов применяются глубинные штанговые насосы, частый отказ которых связан с разрушением поверхностного слоя пары плунжер – цилиндр [1–3]. Учитывая это, в производственной практике получили широкое распространение технологии, направленные на упрочнение поверхности. Для оценки качества термической обработки выгодно использовать акустические волны [4–7]. Особенно важное значение уделяют рэлеевским волнам для контроля качества упрочненных поверхностных слоев металлов [8–10].

Целью работы является определение возможности контроля качества упрочненной поверхности плунжеров с использованием рэлеевских волн.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны 10 плунжеров из стали 17ГС длиной 1370 мм и диаметром 57 мм. Контроль качества плунжеров производился на каждом этапе их производства: состояние постав-

© Хомутов А. С., Синцов М. А., Пушин П. Н., Буханов В. И., 2025

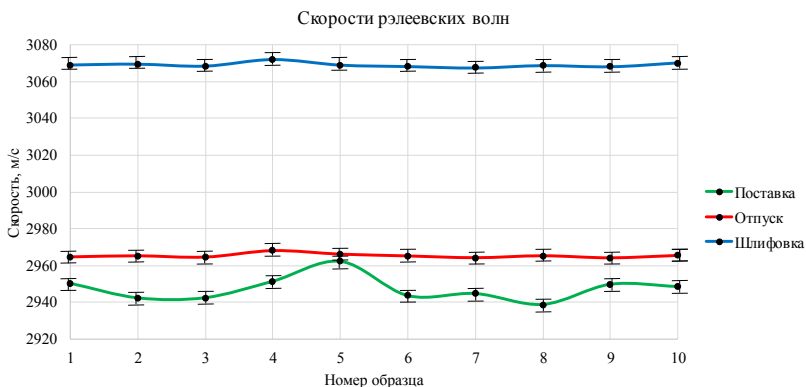
* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

ки, механическая обработка с отпуском и после нанесения поверхностного упрочненного слоя. Упрочнение поверхностного слоя проведено с помощью плазменного напыления и спекания порошка самофлюсующимся сплавом ПР-НХ17СР4-У.

Для проведения экспериментальных исследований контроля упрочненной поверхности плунжера использованы уникальная научная установка «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий», зарегистрированная на портале научно-технологической инфраструктуры Российской Федерации, и изготовленный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) рэлеевских волн с рабочей частотой 2,5 МГц.

Так как рэлеевская волна, возбуждаемая ПЭП, распространяется по огибающей цилиндрической поверхности плунжера, сканирование проводилось только по образующей плунжера, что позволило проводить сканирование со скоростью 10 мм/с.

С помощью установки на основе амплитудного временного метода на многократных проходах по огибающей поверхности и входящего в нее специализированного ПО «ПРИНЦ» были рассчитаны скорости рэлеевских волн, результаты которых для 10 плунжеров представлены на рисунке.



Скорость рэлеевских волн после технологических операций

Как видно из графика на рисунке, скорость рэлеевских волн в плунжерах в состоянии поставки составляет в пределах 2940–2960 м/с, после механической обработки и отпуска 2966 ± 2 м/с и достигает максимума в 3069 ± 2 м/с после финишного спекания и шлифовки.

Выводы

Таким образом, амплитудный временной метод на многократных проходах по огибающей поверхности плунжера с применением рэлеевских волн обеспечивает возможность оценки качества поверхности плунжеров в процессе производства.

Список использованных источников и литературы

1. Хомутов, А. С. Выявление дефектов цилиндра глубинно-штангового насоса после ионного азотирования / А. С. Хомутов, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 16–26. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-2-16-26. – EDN TIHDED.
2. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.
3. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.
4. Влияние способа настройки чувствительности ультразвукового контроля на ее распределение по толщине сварных соединений строительных конструкций / С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков, Е. В. Бояркин [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 81–88. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88. – EDN BCZFAG.
5. A high-speed acoustic-emission diagnostic system / A. N. Ser'eznov, V. V. Murav'ev, L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, V. L. Kozhemyakin, A. E. El'tsov, E. Yu. Lebedev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1998. – Vol. 34, no. 7. – Pp. 481–485. – EDN LERWAF.
6. Муравьева, О. В. Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 3–11. – EDN WYCBJV.
7. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С. Б. Барабанова, В. Л. Кожемякин, С. И. Кабанов // Дефектоскопия. – 1997. – № 10. – С. 79–84. – EDN MOZLLV.
8. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров, В. Б. Харитонов, В. Н. Чаплыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1994. – № 4. – С. 103–107. – EDN TFIYML.
9. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, А. В. Пла-

тунов [и др.] // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42–45. – EDN RRVVQR.

10. Бобров, А. Л. Применение поверхностных ультразвуковых волн для обнаружения контактно-усталостных трещин в поверхности катания / А. Л. Бобров, К. И. Гончаров // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 62–69. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-62-69. – EDN XLMMUC.

A. S. Homutov, postgraduate

M. A. Sintsov, CSc in engineering, head of the laboratory

P. N. Pushin, postgraduate

V. I. Buhanov, student

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Estimation of the Rayleigh Wave Velocity in the Technological Cycle of Plunger Production

This article presents the results of experimental studies of the possibility of ultrasonic testing of heat treatment of the hardened surface of plungers using Rayleigh waves. The method of multiple passes is used.

Keywords: ultrasonic non-destructive testing, surface waves, plunger.

УДК 620.179.16

А. С. Хомутов, аспирант
Е. А. Степанова , *В. Д. Попова*, магистранты
E-mail: seaka00@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Неравномерность осевых остаточных напряжений в цилиндре глубинно-штангового насоса*

Рассмотрены результаты исследования влияния технологических операций изготовления цилиндра глубинно-штангового насоса, изготовленного из стали 38Х2МЮА, на неравномерность распределения осевых остаточных напряжений.

Ключевые слова: осевые остаточные напряжения, цилиндр глубинно-штангового насоса, акустическая анизотропия.

Введение

Остаточные напряжения в процессе изготовления глубинно-штанговых насосов изменяются в результате механических и температурных воздействий, а также при упрочнении внутренней поверхности азотированием [1, 2]. Перспективным вариантом оценки прочностного состояния материала является исследование информативных параметров ультразвуковых волн [3–6].

Определение остаточных напряжений ультразвуковым методом производится с помощью явления акустоупругости [7]. Так, в работах [8–10] приводится расчет напряженно-деформированного состояния труб, подвергшихся пластическому изменению диаметра.

Целью работы является оценка неравномерности осевых остаточных напряжений цилиндра глубинно-штангового насоса после разных стадий технологического процесса изготовления методом акустоупругости.

Материалы и методы

Для оценки остаточных напряжений использовался структуроскоп электромагнитно-акустический (СЭМА) с бесконтактным электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП) поперечных волн,

© Хомутов А. С., Степанова Е. А., Попова В. Д., 2025

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>.

распространяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях [5, 6].

Исследование остаточных напряжений проводилось на цилиндре глубинно-штангового насоса с размерами внутреннего и внешнего диаметра и длиной $57,64 \times 43,65 \times 4450$ мм, изготовленного из стали нитраллой 38Х2МЮА, после четырех стадий технологического процесса изготовления: поставка, операция отпуска (высокотемпературный отпуск при температуре 580°C в течение 1 часа с последующим охлаждением при температуре 400°C 6–8 часов), процесс шлифовки и ионного азотирования.

В ходе экспериментов преобразователь устанавливался на расстоянии 210 см от торца цилиндра и перемещался по окружности на угол α от 0° до 360° с шагом в 90° . Полученные эхограммы многократных отражений обработаны в специализированном программном обеспечении «ПРИНЦ».

Для оценки остаточных напряжений цилиндра использовались значения коэффициента акустической анизотропии по окружности и длине цилиндра [7]:

$$A_i = \frac{2 \cdot (t_2 - t_1)}{t_2 + t_1}, \quad (1)$$

где t_1 , t_2 – время задержки отраженных импульсов поперечной волны с перпендикулярными векторами поляризации между первым и третьим отражениями, мкс.

Последующий пересчет значений акустической анизотропии в относительные значения остаточных напряжений производился по следующей формуле:

$$\sigma_i = \frac{A_i - A_{\text{ср}}}{K_A}, \quad (2)$$

где K_A – коэффициент чувствительности акустической анизотропии к приложенной нагрузке на трубу ($K_A = 0,0013\%$ /МПа).

Результаты и их обсуждение

На рисунке представлены значения осевых остаточных напряжений цилиндра σ на расстоянии 210 см от торца трубы в состоянии поставки, после операций отпуска, шлифовки и азотирования.

График показывает равномерное распределение остаточных напряжений по окружности трубы после операций отпуска и азотирования. После операций поставки и шлифовки наблюдаются как растягивающие, так и сжимающие напряжения.

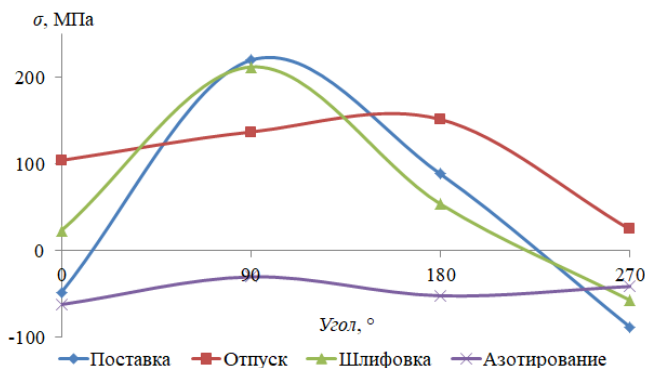


Рис. 2. Значения осевых остаточных напряжений цилиндра по четырем углам после четырех стадий технологического процесса изготовления

Максимум осевых растягивающих напряжений на расстоянии 210 см от торца наблюдается при поставке и после операции шлифовки на углу 90°, а минимум сжимающих – на углах 0 и 270° при тех же операциях. Максимальная неравномерность осевых остаточных напряжений по сечению наблюдается при поставке цилиндра и составляет 307 МПа, минимальная – после операции ионного азотирования и равна 32 МПа. Пределы допускаемой приборной допустимой погрешности измерения временных интервалов $\Delta t = \pm 2$ нс, что соответствует точности определения напряжений выше ± 2 МПа.

Выводы

В ходе проведенных исследований получены относительные значения осевых остаточных напряжений в стенке цилиндра глубинно-штангового насоса, отличающиеся по окружности цилиндра.

Значительная неравномерность остаточных напряжений наблюдается после технологических операций поставки и шлифовки, отпуск и азотирование значительно сглаживают значения.

Список использованных источников и литературы

1. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 86–100. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. – EDN PKTDNX.
2. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев,

А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 87–96. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. – EDN JUTAFX.

3. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1 (59). – С. 52–60. – EDN RTUFSF.

4. *Муравьев, В. В.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 66–70. – EDN QCWUQX.

5. Влияние способа настройки чувствительности ультразвукового контроля на ее распределение по толщине сварных соединений строительных конструкций / С. А. Бехер, С. П. Шляхтенков, Е. В. Бояркин [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 81–88. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-1-81-88. – EDN BCZFAG.

6. *Бобров, А. Л.* Применение поверхностных ультразвуковых волн для обнаружения контактно-усталостных трещин в поверхности катания / А. Л. Бобров, К. И. Гончаров // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 62–69. – DOI 10.22213/2413-1172-2024-3-62-69. – EDN XLMMUC.

7. *Муравьев, В. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости / В. В. Муравьев, К. А. Тапков, С. В. Леньков // Дефектоскопия. – 2019. – № 1. – С. 10–16. – DOI 10.1134/S01303082190100020. – EDN YYTMMH.

8. Анизотропия акустических свойств в тонколистовом прокате низкоуглеродистой марганцовистой стали / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова [и др.] // Дефектоскопия. – 2024. – № 11. – С. 15–29. – DOI 10.31857/S0130308224110021. – EDN AAGJDA.

9. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 42–52. – DOI 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52. – EDN ZAKPZR.

10. *Волкова, Л. В.* Неравномерность акустической анизотропии толстолистого стального проката / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Сталь. – 2021. – № 5. – С. 36–41. – EDN HCVGLB.

A. S. Khomutov, postgraduate
E. A. Stepanova ✉, *V. D. Popova*, master students
E-mail: seaka00@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Unevenness of Axial Residual Stresses in the Cylinders of the Deep-Rod Pump

The influence of technological operations for the manufacture of a cylinder of a deep-rod pump made of 38Kh2MYuA (GOST) steel on the uneven distribution of axial residual stresses are considered.

Keywords: axial residual stresses, cylinder of the deep-rod pump, acoustic anisotropy.

Секция 4. Радиотехника, связь, информационные технологии

УДК 621.396(04)

М. И. Владыкин, магистрант

А. С. Коротков, магистрант

А. К. Черных, магистрант

Е. Г. Булатова , канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: buleg61@mail.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработка управляемой линии задержки

В статье рассмотрены принципы работы линий задержки, основные варианты их подключения и принципов управления. В результате была разработана схема управляемой линии задержки и смоделирована в программе AWR Design Environment.

Ключевые слова: линия задержки, фазированная антенная решетка, приемо-передающий модуль, моделирование, схема электрическая структурная.

Введение

В современном мире радиотехники и связи активно развивается технология активных фазированных антенных решеток (АФАР). АФАР представляют собой систему, состоящую из множества отдельных антенн с электронным сканированием, работающих совместно для формирования направленного излучения. Это позволяет значительно улучшить качество и эффективность радиосигнала.

Ключевым элементом АФАР являются приемо-передающие модули (ППМ), обеспечивающие управление по амплитуде и фазе распределения сигнала в апертуре решетки. ППМ отвечает за прием и передачу радиосигналов, а также за их обработку. Важной составляющей ППМ является управляемая линия задержки (УЛЗ), которая позволяет точно

контролировать фазовые характеристики излучаемого сигнала и, следовательно, направленность излучения.

В данной работе рассмотрены основные принципы работы управляемой линии задержки, их конструктивные особенности, методы их реализации, а также разработана управляемая линия задержки для приемопередающего модуля.

Поэтому целью работы является разработка управляемой линии задержки, которая будет способствовать эффективности работы приемопередающего модуля.

Постановка задачи

Необходимо разработать схему управляемой линии задержки, что позволит точно настраивать фазу и направление излучения антенны.

Требования к устройству:

- точность задержки: УЛЗ должна обеспечивать возможность настройки задержки с высокой степенью точности, что позволит точно управлять фазой сигнала с центральной частотой 3300 МГц и полосой пропускания 400 МГц;

- диапазон задержек: система должна поддерживать различные временные интервалы задержки от 0,5 нс до 2,5 нс, чтобы адаптироваться к различным сценариям использования;

- минимизация потерь сигнала: важно, чтобы линия задержки не вносила значительных потерь в сигнал, что может негативно сказаться на качестве работы системы. Таким образом, коэффициент стоячей волны должен быть до 1,5, затухание передаваемого сигнала от –15 дБ, а обратные потери до –20 дБ.

Решение задачи

Для разработки схемы необходимо рассмотреть основные принципы работы управляемой линии задержки, их конструктивные особенности, методы их реализации, а затем осуществить схемотехническую реализацию требуемого устройства.

Принципы работы

Фазированная антенная решетка (ФАР) – это многоканальные антенны, содержащие набор излучателей, установленных в узлах регулярной или нерегулярной сетки (решетки) и возбуждаемых когерентно от одного генератора. В каналах излучателей решетки установлены устройства, называемые фазовращателями, с помощью которых можно управлять фазами излучаемого поля и за счет этого изменять нужным образом его характеристики, в первую очередь сканировать, то есть из-

менять угловое положение главного лепестка диаграммы направленности (ДН), называемого также лучом. Собственно, три ключевых слова – антенна, решетка и фазовращатель – и определили название этих антенн: ФАР.

Когда сигналы от каждого излучателя идеально совпадают по фазе, они конструктивно создают помехи и производят интенсивное излучение в определенном направлении. Это направление контролируется путем установки фазового сдвига между сигналами, передаваемыми на разные излучатели. Небольшая временная задержка между сигналами, передаваемыми на последовательные излучатели, управляет сдвигом фазы.

Временную задержку можно получить с помощью линии задержки (ЛЗ), устройства, предназначенного для задержки электрических или электромагнитных сигналов на заданный промежуток времени. ЛЗ электрических сигналов на интервалы времени от единиц пикосекунд до десятков микросекунд при сохранении формы колебания необходимы для согласования скорости распространения колебаний в устройствах сложения мощностей, в фазированных антенных решетках, при параллельной многоканальной обработке сигналов и в других приложениях [1].

Способ реализации управляемой линии задержки

Существует множество возможных вариантов для реализации ЛЗ (полосковые, кабельные, ферритовые, акустические и др.), но, исходя из требований к величине задержки и рабочему диапазону частот, подходящими являются только полосковые и кабельные. Если учесть массогабаритные характеристики кабельной ЛЗ, наиболее удачным вариантом выглядит полосковое исполнение [2].

Для управления временем задержки воспользуемся схемой, представленной на рис. 1. Эта каскадная линия с переключаемыми секциями состоит из каскадов, которые состоят из пары синхронно управляемых SPDT-переключателей и двух участков линии задержки, одна имеет временную задержку, другая не имеет.

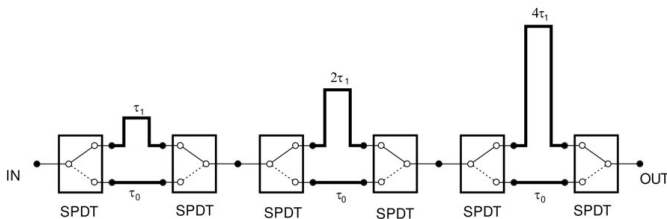


Рис. 1. Общая схема линии задержки с цифровым управлением и переключаемыми участками задержки, пример для числа $N = 3$

Обоснование среды разработки

Для реализации управляемой линии задержки была выбрана программа AWR Design Environment (AWR DE), которая позволяет создавать схемы, состоящие из элементов схем (сосредоточенных и распределённых) и электромагнитных структур. Схемы могут иметь сложную иерархическую структуру, включающую множество подсхем на различных уровнях иерархии. В качестве подсхем могут использоваться ранее созданные схемы или электромагнитные структуры, а также списки цепей, файлы данных или элементы из библиотек сторонних пользователей. Для создания схем имеется обширная библиотека встроенных схемных элементов [3].

Результаты разработки и моделирования

После проведения анализа основных вариантов реализации линии задержки и их конфигураций для моделирования управляемой линии задержки была выбрана каскадная линия с переключаемыми секциями задержки, структурная схема которой показана на рис. 2.

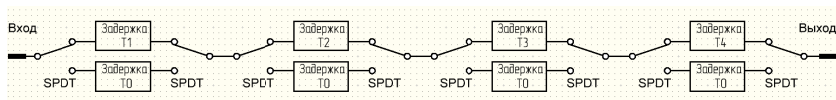


Рис. 2. Структурная схема управляемой линии задержки

На основе спроектированной схемы электрической структурной разработана схема в программе AWR Design Environment.

Скорости, при которых электромагнитные сигналы перемещаются в вакууме или в воздухе, равны скорости света, то есть $3 \cdot 10^8$ м/с. Сигнал движется по линии передачи печатной платы на более низкой скорости, поскольку на нее влияет диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) материала печатной платы [4].

Скорость сигнала в микрополосковой линии:

$$v_m = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_{r_{eff}}}} \approx \frac{v_c}{\sqrt{(0,64\epsilon_r + 0,36)}}, \quad (1)$$

где v_c – это скорость света в вакууме или в воздухе; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость материала печатной платы; $\epsilon_{r_{eff}}$ является эффективной диэлектрической проницаемостью для микрополосковых линий.

Линии задержки изготовлены по тонкопленочной технологии на подложке из керамики – материал марки В20 (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = 20$), материал проводников – медь.

Длина линии определяется по обычной формуле произведения скорости сигнала (v_m) и необходимого времени задержки (t_n) [5]. Таким образом, длина для разных линий с задержкой $t_1 = 0,25$ нс, $t_2 = 0,4$ нс и $t_3 = t_4 = 0,7$ нс:

$$S_1 = 8,275 \cdot 10^7 \cdot 0,25 \cdot 10^{-9} \approx 21 \text{ мм};$$

$$S_2 = 8,275 \cdot 10^7 \cdot 0,4 \cdot 10^{-9} \approx 33 \text{ мм};$$

$$S_3 = S_4 = 8,275 \cdot 10^7 \cdot 0,7 \cdot 10^{-9} \approx 58 \text{ мм}.$$

Для решения задачи проектирования линий передачи в AWR Design Environment используется подпрограмма TXLine, так называемый проектировщик линий, а для моделирования топологии линии – симулятор AXIEM EM Simulator, который использует уравнения Максвелла для вычисления отклика структуры на основе ее физической геометрии. ЕМ-моделирование позволяет моделировать структуры с высокой степенью произвольности и при этом получать очень точные результаты. Кроме того, на эмуляторы не распространяются многие ограничения, присущие схемным моделям, поскольку они используют фундаментальные уравнения для вычисления отклика.

Таким образом, были смоделированы четыре микрополосковые линии задержки с расстоянием между портами 6 мм, которые показаны на рис. 3, а в результате оптимизации модели получена топология с размерами 8×6 мм для ЛЗ на 0,25 нс, 8×9 мм – для 0,4 нс и 22×11 мм – для 0,7 нс. Также на рис. 4 представлена топология «нулевой задержки». Частотные зависимости коэффициента передачи S_{21} , времени групповой задержки (GD), КСВН входа (VSWR) и коэффициента отражения от входа S_{11} и выхода S_{22} представлены на рис. 5–8.

Полученные для диапазона рабочих частот зависимости можно коротко свести в табл. 2.

Согласно структурной схеме на рис. 2 необходимы SPDT-переключатели. Для реализации УЛЗ будем использовать модель отечественного SPDT-переключателя М44228, и для его проектирования воспользуемся готовыми S-параметрами производителя.

Схема управляемой линии задержки представлена на рис. 9. Вход и выход линии согласованы на 50 Ом, материал подложки – поликор с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,8$. Установлены разделительные конденсаторы на 15 пФ на входе и выходе схемы, а также на выходах переключателей. График частотных зависимостей представлен на рис. 10.

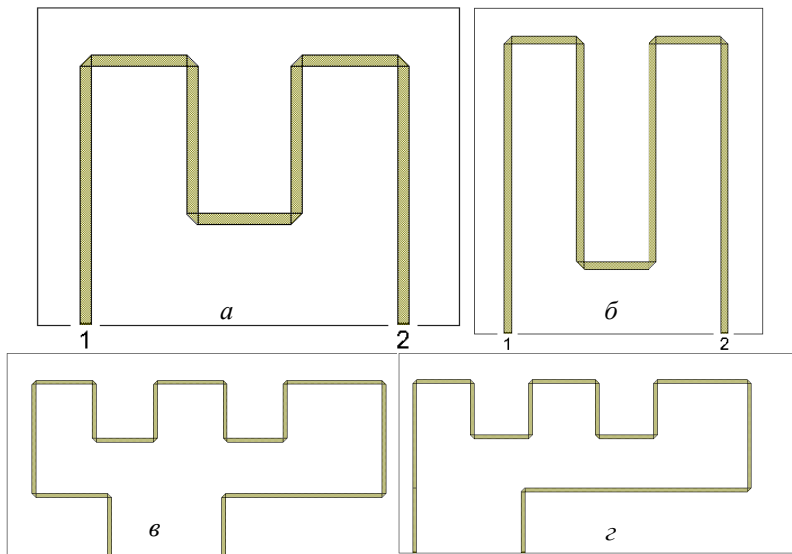


Рис. 3. Топологии линий задержки, выполненные в EM Simulator:
ЛЗ на 0,25 нс (а); ЛЗ на 0,4 нс (б); ЛЗ на 0,7 нс (в, г)

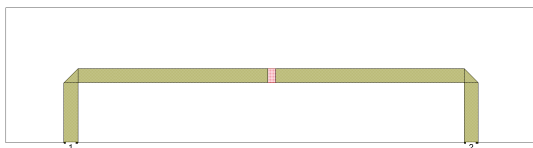


Рис. 4. Топология «нулевой задержки»

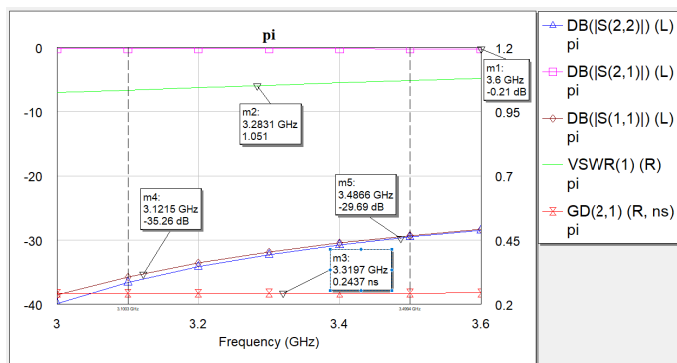


Рис. 5. Результаты моделирования топологии ЛЗ на 0,25 нс

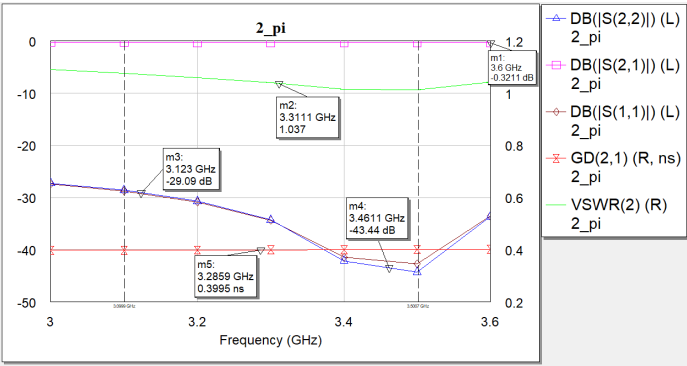


Рис. 6. Результаты моделирования топологии ЛЗ на 0,4 нс

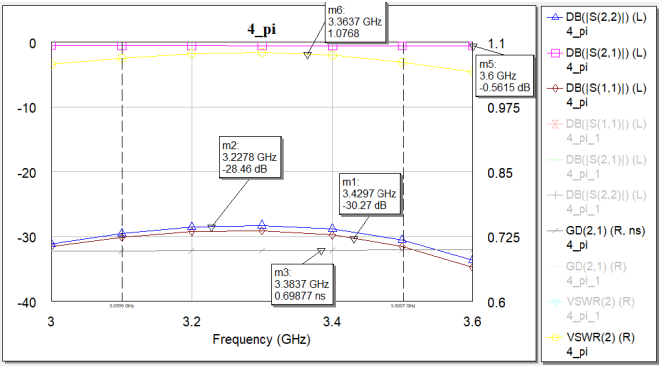


Рис. 7. Результаты моделирования топологии первой ЛЗ на 0,7 нс

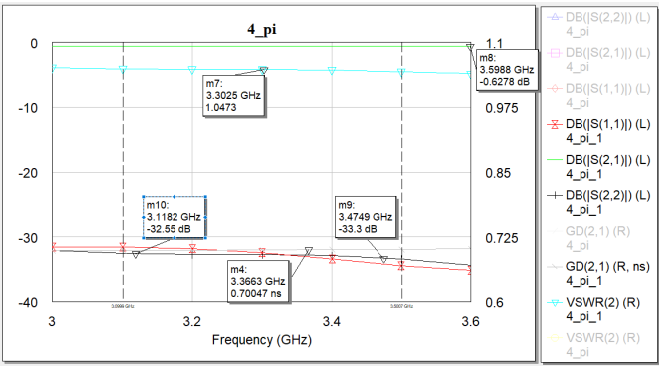


Рис. 8. Результаты моделирования топологии второй ЛЗ на 0,7 нс

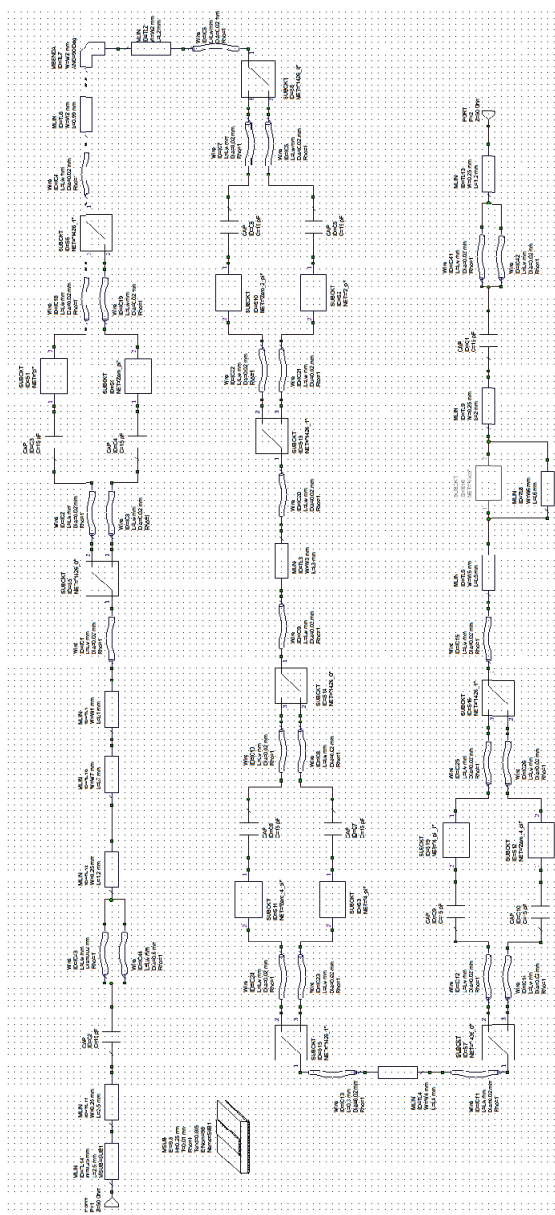


Рис. 9. Схема управляемой линии задержки в программе AWR

Таблица 2. Полученные результаты моделирования

Задержка, нс	S_{11} , дБ	S_{22} , дБ	S_{21} , дБ	VSWR	GD, нс
0,25	-32	-32	-0,2	1,055	0,244
0,4	-35	-35	-0,3	1,037	0,4
0,7	-29	-28,5	-0,54	1,077	0,698
0,7	-32,5	-32,7	-0,6	1,047	0,7

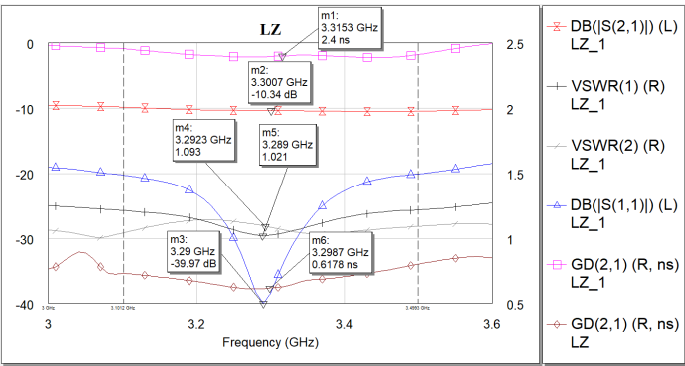


Рис. 10. Частотные зависимости S_{21} , S_{11} , КСВН и время задержки управляемой линии задержки с модулем М44228

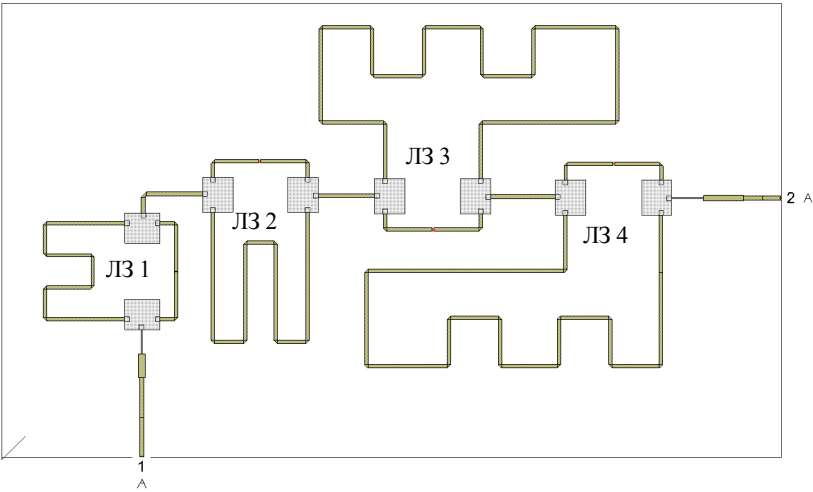


Рис. 11. Топология управляемой линии задержки с модулями М44228

По рис. 10 видно, что максимальная задержка сигнала составляет от 0,61 до 2,4 нс. КСВН примерно 1,1 дБ, вносимые потери минус 10 дБ и обратные потери меньше минус 39 дБ.

Таким образом, топология управляемой линии задержки представлена на рис. 11. В табл. 3 приведены 16 возможных комбинаций времени задержки, полученные при моделировании в программе AWR DE.

Таблица 3. Время задержки при различных комбинациях линии задержки

№	Линия задержки				Время задержки, нс
	1	2	3	4	
1	0	0	0	0	0,61
2	1	0	0	0	0,8
3	0	1	0	0	0,95
4	0	0	1	0	1,24
5	0	0	0	1	1,27
6	1	1	0	0	1,14
7	1	0	1	0	1,42
8	1	0	0	1	1,46
9	0	1	1	0	1,6
10	0	1	0	1	1,6
11	0	0	1	1	1,89
12	1	1	1	0	1,76
13	1	1	0	1	1,80
14	1	0	1	1	2,08
15	0	1	1	1	2,24
16	1	1	1	1	2,4

Примечание: 0 – ЛЗ отключена, 1 – ЛЗ подключена

Вывод

В работе рассмотрены основные разновидности линий задержки и их классификация по типу сигнала, по способу реализации и по функциональным характеристикам. Изучены основные принципы работы, проведен анализ основных конфигураций подключения линий задержки, была разработана управляемая линия задержки с использованием переключателей в программе AWR Design Environment.

В целом результаты работы подтверждают возможность проектирования управляемых линий задержки с использованием переключателей в программе AWR Design Environment, что открывает новые возможности для разработки и улучшения радиосистем.

Список используемых источников и литературы

1. *Кочемасов, В.* Фиксированные линии задержки / В. Кочемасов, Л. Белов, А. Майстренко // СВЧ электроника. – 2017. – № 2. – С. 28–38. – URL: <https://microwave-e.ru/modules/fiksirovannye-linii-zaderzhki/> (дата обращения: 25.10.2024).
2. *Кочемасов, В.* Управляемые линии задержки / В. Кочемасов, Л. Белов, А. Майстренко // СВЧ электроника. – 2017. – № 3. – С. 31–41. – URL: <https://microwave-e.ru/wp-content/uploads/3104.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
3. *Мительман, Ю. Е.* Автоматизированное проектирование микроволновых устройств в AWR DE : учеб. эл. текст. изд-е / Ю. Е. Мительман. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – URL: <https://study.urfu.ru/Aid/Publication/10967/1/Mitelman-1.pdf> (дата обращения: 25.10.2024).
4. *Гальперин, М. В.* Электротехника и электроника / М. В. Гальперин. – Москва : Форум, 2013. – 480 с. – URL: https://agrarniy.volgatech.net/studentu/organizatsiyadosuga/Galperin_M_V_Elektronnaya_tekhnika_2010.pdf (дата обращения: 25.10.2024).
5. *Харкевич, А. А.* Основы радиотехники / А. А. Харкевич. – Москва : Физматлит, 2007. – 518 с. – URL: http://lib.y-su.am/disciplines_bk/7edfde0d8153fe824e2014f0b72bcb03.pdf (дата обращения 25.10.2024).

M. I. Vladykin, mater student

A. S. Korotkov, master student

A. K. Chernyh, master student

E. G. Bulatova [✉], CSc in physics and mathematics, assoc. prof.

E-mail: buleg61@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development of Controlled Delay Line

This article discusses the principles of operation of delay lines, the main options for their connection and control principles. As a result, a controlled delay line circuit was developed and modeled in the AWR Design Environment program.

Keywords: delay line, phased array antenna, transceiver module, modeling, electrical structural circuit.

УДК 004.7

С. С. Колмогорова [✉], канд. техн. наук, доц.

Т. Д. Бабурин, студент

Е-mail: ss.kolmogorova@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Применение программного обеспечения GNU Radio для разработки систем радиомониторинга на основе программно-конфигурируемого радио

В статье представлены разработка и использование систем радиомониторинга на базе программно-конфигурируемых радиосистем с помощью GNU Radio. В радиочастотной среде обеспечение информационной безопасности и обнаружение возможных опасностей напрямую связано с обработкой и фильтрацией сигналов. Изучаются различные подходы радиомониторинга, среди которых спектральный анализ и автоматическая идентификация незаконных радиосигналов. Описан процесс создания приемника в GNU Radio, представлены блок-схемы обработки сигналов и анализ полученных данных. Выбор подходящих параметров обработки данных и технических средств существенно сказывается на качестве сигналов, которые принимаются и передаются, что способствует повышению защищенности сетей связи.

Ключевые слова: радиомониторинг, безопасность информации, программно-конфигурируемое радио, GNU Radio, обработка сигналов, спектральный анализ, несанкционированные сигналы.

Введение

Использование программного обеспечения GNU Radio при разработке систем радиомониторинга на основе программно-определяемого радио (SDR) доказало свою высокую эффективность и универсальность. Эта программная платформа позволяет создавать приложения для мониторинга, тестирования и оценки различных радиосигналов и протоколов в режиме реального времени, расширяя возможности технологий SDR в различных областях.

В одном из исследований [1] была продемонстрирована разработка приложения для обнаружения частот и каналов в GNU Radio, которое достигло 100 % успеха в определении сигналов со скачкообразным изменением частоты в различных сценариях. Приложение использовало

SDR-платформу USRP N310, было протестировано в различных условиях и продемонстрировало свою надежность для решения передовых задач в области телекоммуникаций и управления спектром.

В работах [2, 3] предложена программная тестовая площадка, позволяющая эффективно тестировать протоколы физического уровня в реальных сценариях трафика, что повышает эффективность оценки приложений GNU Radio. Она поддерживает интеграцию различных генераторов трафика и собирает данные мониторинга, специфичные для РНУ, облегчая комплексную визуализацию и мониторинг в реальном времени.

Практические приложения GNU Radio [4] также применяются в практических сценариях, таких как перехват радиоуправляемых моделей, демонстрируя способность эффективно обнаруживать радиосигналы и манипулировать ими. Кроме того, разработка [5] приемопередатчика OFDM с адаптивной модуляцией в GNU Radio подчеркивает его гибкость при работе с переменной скоростью передачи данных и условиями канала.

GNU Radio дает значительные преимущества при разработке SDR, остаются задачи, связанные с оптимизацией производительности и обеспечением совместимости различных систем. Решение этих проблем будет иметь решающее значение для будущего систем радиомониторинга.

Постановка задачи

Основная задача данного исследования заключается в практической разработке приемника на платформе GNU Radio с целью изучения влияния цифровой обработки радиосигналов. Это включает в себя создание структурной схемы модуля, разработку программного обеспечения для спектрального анализа и автоматического выявления несанкционированных сигналов, а также анализ восстановленных данных для оценки эффективности применяемых методов обработки, что в конечном итоге направлено на повышение безопасности информации в радиочастотном диапазоне.

Сведения из теории

Программно-конфигурируемое радиоустройство (ПКР или SDR) представляет собой передатчик и/или приемник, который применяет программные средства для изменения рабочих характеристик, таких как диапазон частот, вид модуляции или мощность сигнала на выходе [6]. Устройство, способное работать как передатчик или приемник радиосигналов, использует программное обеспечение для изменения своих параметров работы, таких как диапазон частот, метод модуляции и уровень мощности, выполняя большую часть обработки сигнала на стан-

дартном персональном компьютере или на программируемой логической микросхеме. Радиомониторинг – важный элемент информационной безопасности, защищающий от угроз радиочастотного спектра (РЧС). Он включает наблюдение и анализ радиосигналов для выявления и локализации потенциальных опасностей, что особенно актуально с ростом беспроводных устройств. Потеря контроля над РЧС может привести к утечке конфиденциальной информации и другим серьезным последствиям [7].

Эффективность радиомониторинга зависит от используемых методов и инструментов, включая радиоприемники с высокой чувствительностью и цифровые преобразователи [8]. Применяются узкополосные и широкополосные приемники для различных задач. Ключевые методы анализа – спектральный и временной анализ, а также автоматизация с помощью машинного обучения.

Современные автоматизированные системы мониторинга могут обнаруживать и локализовать источники сигналов с высокой точностью, архивируя данные для ретроспективного анализа инцидентов. Подозрительные сигналы могут проявляться в аномально высокой мощности, наличии гармоник, изменениях параметров, нестандартных методах модуляции и использовании зашифрованных сигналов.

Для эффективного радиомониторинга необходим комплексный подход с использованием современных технологий и интеграцией с другими системами безопасности, что позволяет создать единую картину угроз и принимать меры реагирования.

Описание эксперимента и результаты

Для практической реализации приемника используется свободное программное обеспечение GNU Radio [9, 10], которое предоставляет мощные инструменты для обработки сигналов. В данном случае мы будем работать с сигналом, который был сгенерирован на основе псевдослучайных чисел и записан в формате WAV. Это позволяет нам анализировать и обрабатывать аудиосигналы с высокой точностью и гибкостью. На схеме представлена последовательность блоков для цифровой обработки сигнала (рис. 1).

Сигнал сначала поступает из WAV-файла через блок Wave File Source, который настроен на частоту дискретизации 48 кГц. Это стандартная частота, которая обеспечивает хорошее качество звука. Далее используется блок (Rational Resampler), который позволяет изменять частоту дискретизации сигнала, необходимую для корректной работы со звуковой картой и для дальнейшей цифровой обработки. В данном случае коэффициенты ресэмплинга равны 1, так как

исходный сигнал и его запись производились на одной и той же частоте 48 кГц.

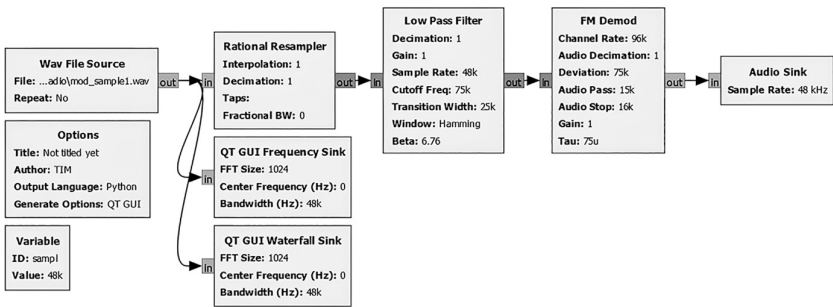


Рис. 1. Обработка сигнала

Следующий этап обработки включает использование фильтра низких частот (Low Pass Filter). Этот фильтр отбирает необходимые частоты, чтобы исключить шумы и нежелательные сигналы. Параметры фильтра задаются следующим образом: частота дискретизации (Sample Rate) равна 48 кГц, частота среза (Cutoff) установлена на уровне 20 кГц, а ширина переходной зоны (Transition Width) составляет 5 кГц. Параметр децимации (Decimation) остается равным 1, что означает, что мы не уменьшаем частоту дискретизации на данном этапе.

После фильтрации сигнал проходит через блок частотной демодуляции (FM Demod), который позволяет извлекать информацию из модулированного сигнала. Входная частота для этого блока также равна 48 кГц, а Audio Decimation установлен на 1, что опять же указывает на отсутствие изменения частоты дискретизации. В конце обработки используется блок Audio Sink, который выводит аудиосигнал на звуковое устройство.

Дополнительно в системе предусмотрены два блока для графического отображения: QT GUI Frequency Sink и QT GUI Waterfall Sink. Первый блок позволяет визуализировать частоту сигнала в реальном времени, а второй демонстрирует спектр сигнала во временной области, что дает возможность наблюдать динамические изменения спектра.

В качестве примера мы возьмем WAV-файл с мелодией и применим к нему частотную модуляцию, используя схему, представленную на рис. 2.

Эта схема позволяет нам получить спектр мелодии и ее частотный график до и после манипуляции (рис. 3–6).

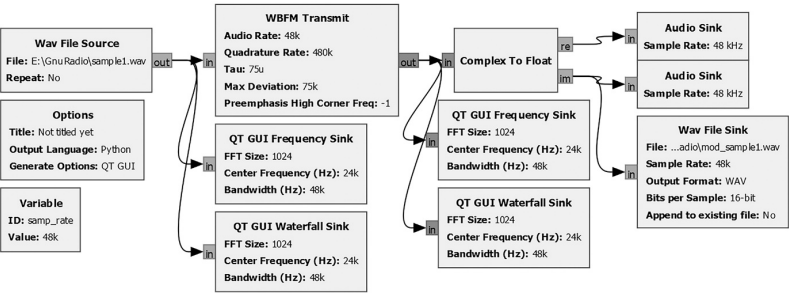


Рис. 2. Схема частотной модуляции сигнала из файла

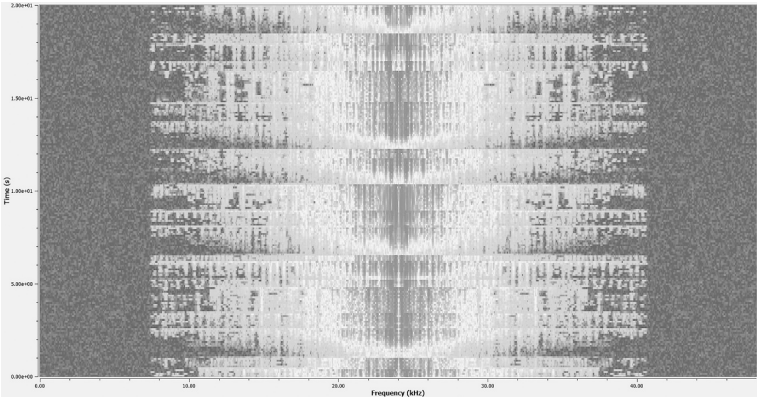


Рис. 3. Спектр перед манипуляцией

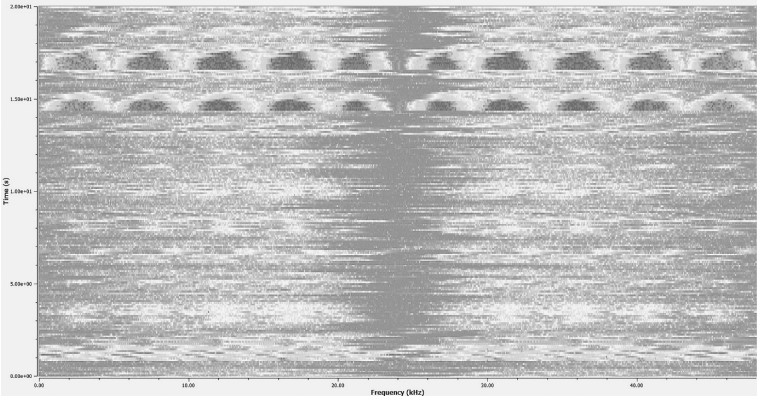


Рис. 4. Спектр после манипуляции

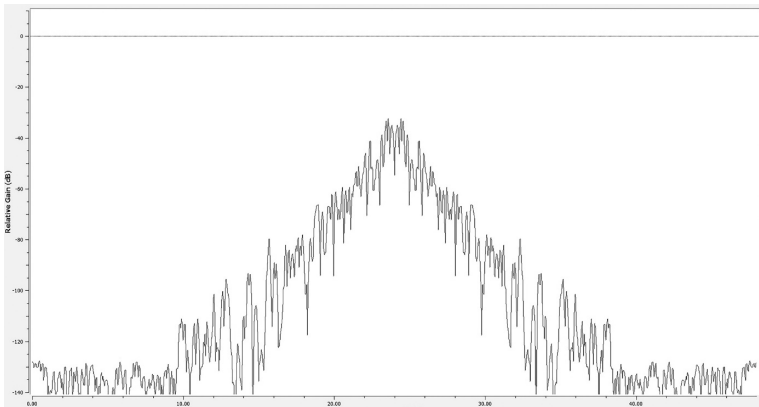


Рис. 5. Частотный график перед манипуляцией

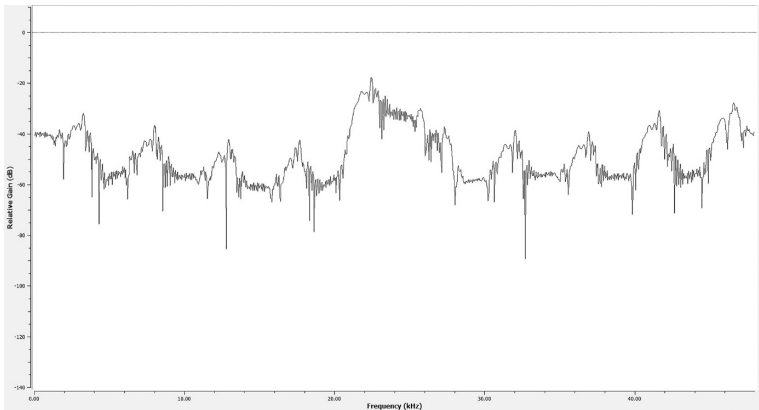


Рис. 6. Частотный график после манипуляции

Заметно, что амплитуда звука стала более выразительной, что свидетельствует о повышении уровня звучания почти на всех частотах. Это можно увидеть на графике частот, где видно повышение уровня звука почти во всех диапазонах. В результате новый файл теперь звучит не столько как мелодия, сколько как шум с едва различимым ритмом, что является нормой, учитывая установленное значение параметра Sensitivity в модуляторе частоты Frequency mod.

На следующем этапе мы выбираем этот файл с модифицированным сигналом в качестве источника данных для последующей схемы (рис. 7),

где мы будем возвращать сигнал к его исходному состоянию через процесс демодуляции.

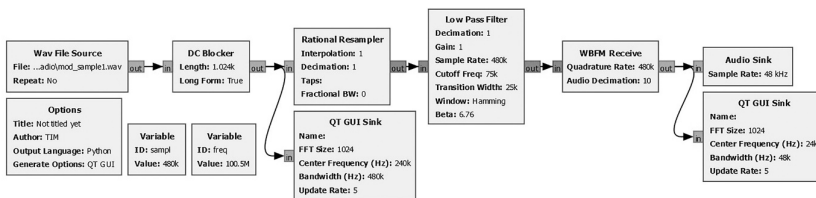


Рис. 7. Схема частотной демодуляции сигнала из файла

Проведенный далее эксперимент демонстрирует процесс демодуляции сигнала и анализ его спектра до и после обработки (рис. 8–11).

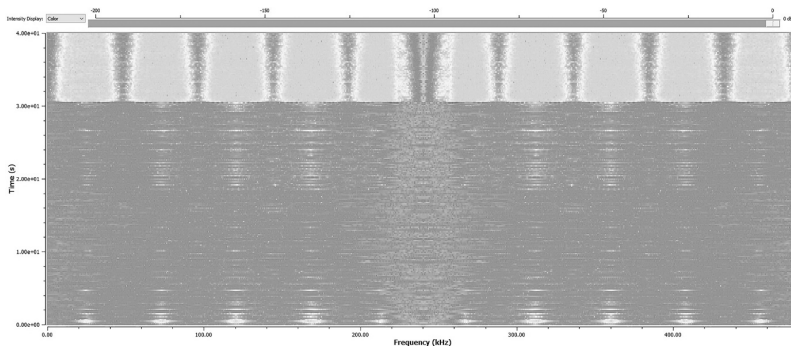


Рис. 8. Спектр сигнала до обратной манипуляции

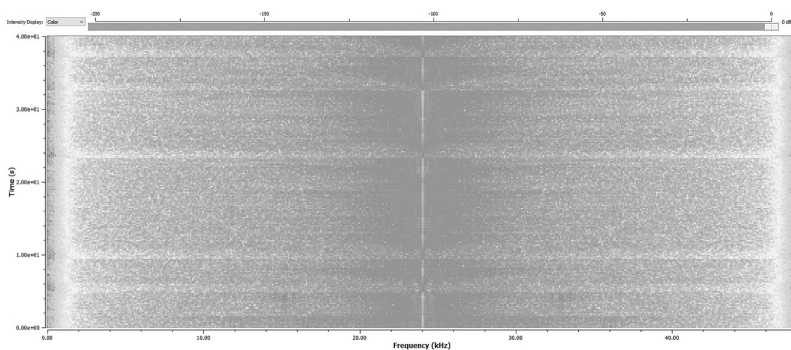


Рис. 9. Спектр сигнала после обратной манипуляции

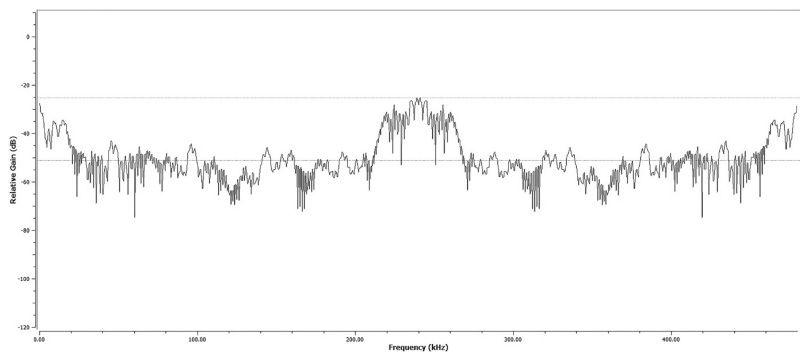


Рис. 10. Частотный график до обратной манипуляции

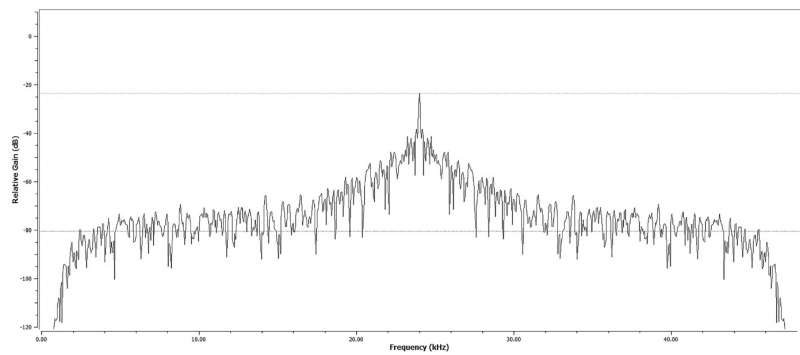


Рис. 11. Частотный график после демодуляции

На спектре сигнала после демодуляции можно наблюдать «вставки» или пропуски в спектре, свидетельствующие о несовершенстве процесса демодуляции и, возможно, о потерях информации в процессе передачи или о наличии помех. Эти пропуски могут быть вызваны различными факторами, включая ограниченную полосу пропускания используемого оборудования, неидеальную характеристику фильтров или наличие импульсных помех.

Аналогичная ситуация наблюдается на частотных графиках. Хотя уровень сигнала в децибелах после демодуляции (рис. 11) возвращается к исходному значению (до модуляции, рис. 10), гладкость кривой частотной характеристики изменяется. Сглаживание кривой, наряду с пропущенными частотами, подтверждает неидеальность процесса демодуляции и, потенциально, наличие искажений в восстанавливаемом сигнале.

Для практической демонстрации приема и обработки радиосигнала используется программное радио (SDR) на базе платформы HackRF One. Схема приема (рис. 12) включает несколько ключевых компонентов.

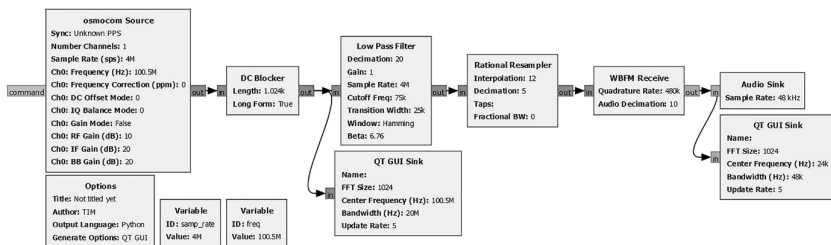


Рис. 12. Обработка сигнала из эфира

Вначале необходимо конфигурировать генератор сигнала *osmoscom Source*, определяя параметры дискретизации (*samp_rate*) и рабочую частоту (*freq*). Выбор *samp_rate* = 4e6 (4 МГц) определяет частоту дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в HackRF One. Это значение должно быть достаточно высоким, чтобы удовлетворить теореме Котельникова – Найквиста и избежать эффекта наложения спектров. Выбранная частота *freq* = 100,5 МГц определяет частоту принимаемого радиосигнала. Выбор конкретной частоты зависит от используемого радиовещательного диапазона (в данном случае, предположительно, FM-диапазон).

Следующий этап включает интеграцию блока *DC Blocker* [11, 12], предназначенного для подавления постоянной составляющей сигнала, которая может быть обусловлена несовершенством аналоговой части тракта приема или наличием помех. Подавление постоянной составляющей необходимо для предотвращения перегрузки аналого-цифрового преобразователя и искажений восстанавливаемого сигнала.

Затем применяется фильтр нижних частот (ФНЧ) с частотой среза (*cutoff*) 75 кГц. Это значение определяется шириной полосы FM-сигнала. Выбор 75 кГц обеспечивает прохождение необходимого диапазона частот и подавление внеполосных помех. Параметр *Transition Width* также играет важную роль в формировании характеристик фильтра. Оптимальное значение данного параметра 25000.

Чтобы звуковая карта могла обрабатывать цифровой поток данных с частотой 4 МГц, необходимо привести частоту дискретизации к допустимому уровню. Это достигается с помощью процедуры уменьшения числа выборок, известной как децимация. В данном примере коэффициент децимации установлен на значение 20, что означает, что мы

будем уменьшать частоту дискретизации в 20 раз. Это позволяет создать поток данных, который будет совместим с аудиоустройствами.

Затем наступает этап демодуляции FM-сигнала, который осуществляется с помощью блока *WBFM Receive*, находящегося в категории *modulators* [13]. Значение *Quadrature Rate* соответствует частоте входных семплов и оставляется по умолчанию в 480k. Для децимации устанавливаем значение 10, чтобы на выходе получить поток с частотой дискретизации в 48k.

И, наконец, применяется блок аудиовывода *Audio Sink*. С помощью модулей *QT GUI Sink*, подключенных к источнику сигнала и к преобразователю, можно провести анализ и сопоставление графиков частот до и после демодуляции, а также изучить спектр радиозэфира [14] (рис. 13–16).

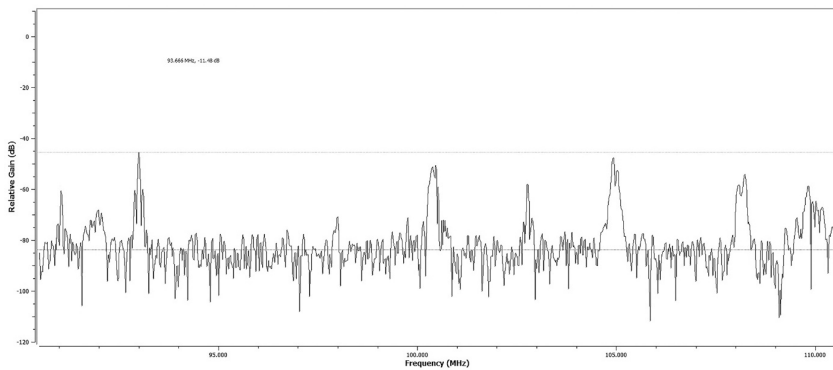


Рис. 13. Частотный график до манипуляции

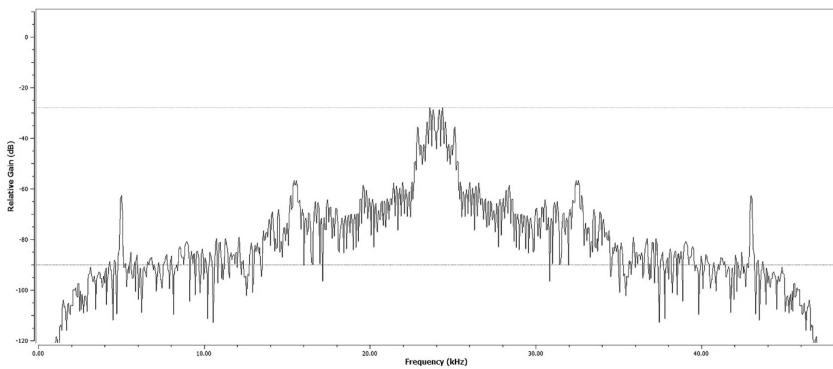


Рис. 14. Частотный график после манипуляции

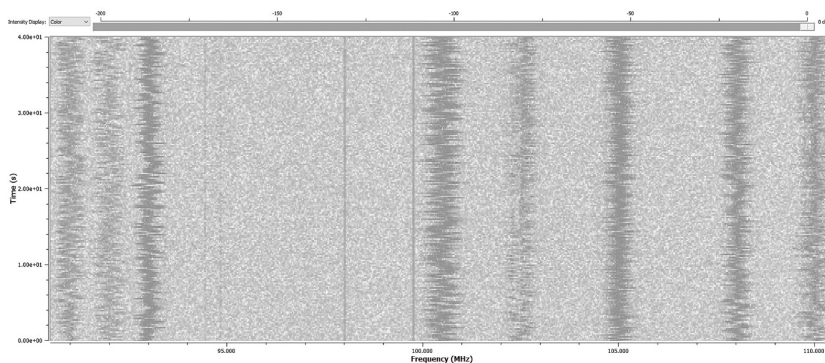


Рис. 15. Спектр эфира до манипуляции

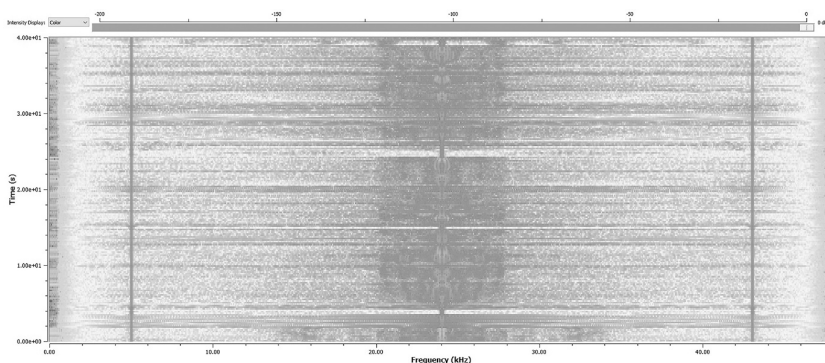


Рис. 16. Спектр эфира после манипуляции

В итоге мы видим, что частотный график эфира демонстрирует несколько «пиков», соответствующих радиостанциям. В спектре они проявляются как наиболее «сильные» частоты, а после демодуляции сигнал становится более однородным.

Сравнительный анализ

Проанализировав сигналы из заранее подготовленного файла и в режиме реального времени, можно сделать выводы о надежности полученной информации. При исследовании спектров сигналов после их обработки становится очевидно, что для заранее созданного файла (например мелодии) цветовой переход на графиках в начале и конце частотной оси выглядит чересчур резким – от оранжево-желтых оттенков до зеленого и голубого. Это указывает на то, что некоторые частоты

были обрезаны, что может вызвать заметные искажения звука после демодуляции. В отличие от этого, спектр сигнала из эфира демонстрирует более плавный переход цветов, что обеспечивает минимальные искажения звука.

Разница в качестве звучания объясняется изначальным состоянием сигнала и методом его передачи. На спектре сигнала из файла выделяются лишь несколько частот с высоким уровнем, в то время как спектр эфира ярко отображает все частоты в заданном диапазоне, что влияет на целостность сигнала при фильтрации. Графики частот также подтверждают эти наблюдения: демодулированный сигнал из файла выглядит менее четким по сравнению с графиком эфира.

Выводы и заключение

Анализ всех факторов указывает на то, что определение подходящего метода и ПО для мониторинга радиосигналов обусловлено индивидуальными свойствами сигналов и необходимостью их высокой точности обработки. Сигналам необходимо иметь определенную мощность для того, чтобы они могли быть переданы с целью обеспечения стабильности данных и их последующего качественного использования. Если же данные будут обработаны неправильно, они станут неверными и окажутся бесполезными. Выбор подходящего ПО, которое позволяет регулировать основные настройки, включая битрейт и тип модуляции, имеет решающее значение для защиты сигнала от потери данных и минимизации его искажений.

Для анализа и обработки радиосигналов GNU Radio предоставляет гибкий и универсальный комплекс программных средств, способствующий успешной реализации различных методик радиоконтроля. Для достижения оптимальной эффективности в исследовании и преобразовании радиочастотных сигналов может потребоваться объединение различных подходов. GNU Radio является важным инструментом для разработки систем радиомониторинга на основе SDR. Его графический интерфейс, поддержка различных языков программирования и возможность интеграции с аппаратными устройствами делают его универсальным решением для исследователей и инженеров в области радиосвязи.

Список использованных источников и литературы

1. Enhanced Spectrum Monitoring Capabilities Based on Software-Defined Radio Systems: Validation of a Real Time Frequency Hopping Signal Detection / Mirela Șorecău, Emil Șorecău, Rareș Cîrstea, Paul Bechet // International Conference Knowledge Based Organization. – 2024. – Doi: 10.2478/kbo-2024-0099.

2. *Stef, M.*, Software Platform for the Comprehensive Testing of Transmission Protocols Developed in GNU Radio / Mihai P. Stef., Zsolt Alfréd Polgár // Information. – 2024. – DOI: 10.3390/info15010062.
3. *Mihai, P. Stef.* Software Platform for Comprehensive Testing of Transmission Protocols Developed in GNU Radio / Mihai P. Stef., Zsolt Alfréd Polgár. – 2023. – DOI: 10.20944/preprints202312.1974.v1.
4. Interception of a Radio-controlled Model by Means of a Software-defined Radio and GNU Radio Companion / Evgeny I. Chervinko, Mikhail A. Gordeev, Vitaliy V. Moshkov, Oleg A. Guminskiy. – 2023. – Doi: 10.1109/ncs60404.2023.10397533.
5. *Zsolt, Polgár.* OFDM Transceiver with Adaptive Modulation Implemented in GNU Radio / Zsolt Polgár, M. Stef. – 2023. – Doi: 10.1109/tsp59544.2023.10197787.
6. *Галкин, В. А.* Основы программно-конфигурируемого радио. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2023 – 316 с.
7. *Деменков, Н. П.* Модельно-ориентированное проектирование систем управления // Кафедра «Технологии программирования» Университета ИТМО. URL: <http://is.ifmo.ru/miscellaneous/matlabstimulink.pdf> (дата обращения: 20.11.2024).
8. *Колмогорова, С. С.* Обработка и фильтрация измерительных данных с сенсорных элементов / С. С. Колмогорова, М. Ю. Вахрушев, Т. Д. Бабурин // Приборы. – 2023. – № 12 (282). – С. 8–17. – EDN LPZZYA.
9. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR / Г. А. Фокин, В. А. Лаврухин, Д. А. Волгушев, А. В. Киреев // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 60, № 2. – С. 94–99.
10. Практическая реализация приемопередатчика ОФМ-2 на SDR платформе Ettus B210 в среде GNU Radio / Г. А. Фокин, В. А. Лаврухин, Д. А. Волгушев, А. В. Киреев // Информационные технологии моделирования и управления. – 2016. – Т. 99, № 3. – С. 178–187.
11. *Фокин, Г. А.* Современные тенденции в области программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании : VI Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. (Санкт-Петербург, 1–2 марта 2017 г.) : сб. науч. ст. : в 4 т. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2017. – Т. 1. – С. 271–276.
12. *Цветков, Ф. А.* Программно-конфигурируемые радиоустройства: принципы построения и алгоритмы обработки сигналов / Ф. А. Цветков, В. В. Терешков. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2020. – 165 с.
13. Software Defined Radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR / R. W. Stewart, K. W. Barlee, D. S. W. Atkinson, L.H. Crockett. – Glasgow : Strathclyde Academic Media, 2015.
14. The Free & Open Soft Radio Ecosystem // GNU Radio. – URL: <https://www.gnuradio.org> (дата обращения: 20.11.2024).

S. S. Kolmogorova [✉], CSc in engineering, assoc. prof.

T. D. Baburin, student

E-mail: ss.kolmogorova@mail.ru

Saint-Petersburg State Forest Technical University Named after S. M. Kirov,

Saint-Petersburg, Russia

Application of GNU Radio Software to Develop Radio Monitoring Systems Based on Software-Configurable Radio

The article presents the development and use of radio monitoring systems based on software-configurable radio systems using GNU Radio. In the radio frequency environment, ensuring information security and detecting possible hazards is directly related to signal processing and filtering. Various radio monitoring approaches are being studied, including spectral analysis and automatic identification of illegal radio signals. The process of creating a receiver in GNU Radio is described, block diagrams of signal processing and analysis of the received data are presented. The choice of suitable data processing parameters and technical means significantly affects the quality of the signals that are received and transmitted, which helps to increase the security of communication networks.

Keywords: radio monitoring, information security, software-configurable radio, GNU Radio, signal processing, spectral analysis, unauthorized signals.

УДК 621.396.67*А. Н. Копысов* ^a, канд. техн. наук, доц.*Д. С. Бахмурнов* ^b, магистрантE-mail: ^a kan_kan@istu.ru, ^b bahmurnov.danil@yandex.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработка микрополосковой патч-антенны для применения в навигационной системе GPS

Постоянно растущий спрос на коммуникационное оборудование требует эффективной конструкции антенны небольшого размера для диапазона частот GPS. Благодаря различным преимуществам, таким как компактные размеры, простота интеграции, низкая стоимость и т. д., микрополосковая антенна нашла широкое применение в системах связи. Проведено исследование микрополосковой патч-антенны для GPS с использованием метода зондовой подачи. Анализ проводится на двух разных подложках, а именно FR-4 и RT Duroid 5880 с диэлектрической проницаемостью 4,3 и 2,2 соответственно. Антенна моделируется с использованием HFSS 2014, проанализированы такие параметры антенны, как обратные потери, КСВН, усиление, полоса пропускания. Проиллюстрирована процедура проектирования микрополосковой патч-антенны для системы GPS.

Ключевые слова: GPS, КСВН, обратные потери, микрополосковая антенна.

Введение

Антенна – это устройство, преобразующее электрическую энергию в электромагнитную волну и наоборот [1]. На рынке доступно множество типов антенн, но в силу различных преимуществ здесь выбрана микрополосковая антенна [2]. Плоская микрополосковая патч-антенна имеет очень маленькую проводящую патч-панель, заземляющую плоскость и подложку [3]. Из-за недостатков других антенн, таких как громоздкость, стоимость и т. д., все большее распространение получает микрополосковая патч-антенна, которая имеет такие преимущества, как низкая стоимость, небольшой вес, а также эти антенны интегрированы с микроволновыми интегральными схемами. Обычно микрополосковые патч-антенны характеризуются длиной, шириной, усилением и диаграммами направленности и т. д. [4] В статье обсуждаются различные параметры микрополосковых патч-антенн и их конструктивные особен-

ности. Также проводится моделирование и сравнение результатов для двух различных подложек – FR-4 и RT Duroid 5880.

Микрополосковая патч-антенна

Теоретически излучающая металлическая пластина может быть спроектирована любой формы, но в основном используется обычная форма, например круглая и прямоугольная [5]. Существуют и другие используемые конфигурации, которые сложны для анализа и требуют очень больших численных расчетов. В своей наиболее распространенной форме микрополосковая патч-антенна имеет излучающую пластину (патч) поверх диэлектрического материала подложки, которая имеет заземляющую плоскость в нижней части. Это показано ниже на рис. 1.

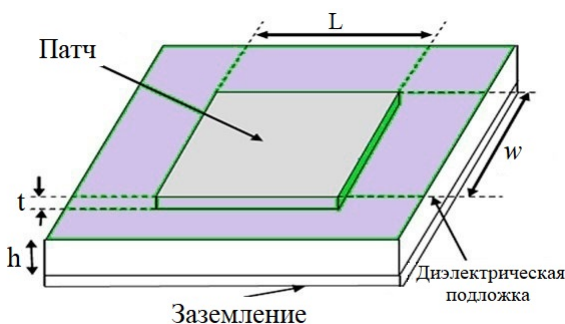


Рис. 1. Структурная схема микрополосковой патч-антенны

Пластина (патч) обычно изготавливается из проводящих излучающих материалов, таких как золото, медь и т. д., и может иметь любую возможную форму [8]. Для верхней пластины прямоугольной формы длина L верхней пластины составляет $0,3333\lambda_0 < L < 0,5\lambda_0$, где λ_0 обозначает длину волны свободного пространства. Прямоугольная пластина выбирается очень тонкой, например $t \ll \lambda_0$ (t – толщина верхней пластины). Высота h диэлектрического материала подложки составляет $0,003\lambda_0 \leq h \leq 0,05\lambda_0$. Константа диэлектрической подложки ϵ_r обычно определяется в диапазоне $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. [6]

Технические параметры антенны

При проектировании прямоугольной микрополосковой антенны необходимо учитывать три важных параметра:

1. Резонансная частота f_r . Мобильные системы связи (GPS) используют диапазон частот от 1000 до 2000 МГц. Поэтому разработанная ан-

тенна должна иметь возможность работать в этом желаемом диапазоне частот. Резонансная частота по умолчанию, выбранная для исследовательских разработок, составляет $f_r = 1,565$ ГГц.

2. Диэлектрическая проницаемость материала подложки ϵ_r . В качестве диэлектрического материала для данной конструкции выбраны RT Duroid 5880 и FR-4, имеющие диэлектрическую проницаемость 2,2 и 4,3 соответственно.

3. Высота диэлектрической подложки h . Для использования микрополосковой патч-антенны в системе связи очень важно, чтобы антенна была легкой и компактной по размеру [7]. Поэтому высота диэлектрической подложки выбрана равной 1,6 мм.

Процесс проектирования

Расчет ширины W верхней пластины (патча) определяется по формуле

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (1)$$

Подставив $c = 3 \times 10^8$ м/с, $\epsilon_r = 2,2$ и $f_r = 1,565$ ГГц, можно определить, что $W = 58$ мм, а если $\epsilon_r = 4,3$, то $W = 72$ мм.

Эффективная диэлектрическая проницаемость (ϵ_{eff}) определяется по формуле

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}. \quad (2)$$

Подставив $\epsilon_r = 2,2$, $W = 58$ мм и $h = 1,565$ мм, можно определить, что $\epsilon_{eff} = 2,234$, а для $\epsilon_r = 4,3$, $W = 72$ мм получаем $\epsilon_{eff} = 4,507$.

Эффективная длина L_{eff} определяется по формуле

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}}. \quad (3)$$

Подставив $\epsilon_{eff} = 2,234$, $c = 3 \times 10^8$ м/с и $f_r = 1,565$ ГГц, можно определить, что $L_{eff} = 46,66$ мм, а для $\epsilon_{eff} = 4,507$ получаем $L_{eff} = 65,66$ мм.

Длина удлинения ΔL определяется по формуле

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)(\frac{W}{h} + 0,264)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)(\frac{W}{h} + 0,8)}. \quad (4)$$

Подставив $\epsilon_{eff} = 2,234$ и другие соответствующие значения, можно определить $\Delta L = 0,833$ мм.

Фактическая длина верхней пластины L определяется с помощью выражения

$$L = L_{eff} - 2\Delta L. \quad (5)$$

При $L_{eff} = 46,66$ мм и $\Delta L = 0,833$ мм фактическая длина $L = 45$ мм, а при $L_{eff} = 65,6666$ мм и $\Delta L = 0,833$ мм фактическая длина $L = 64$ мм.

Из вышеприведенного математического расчета параметры пластины были рассчитаны для подложки RT Duroid 5880 с $\epsilon_r = 2,2$. Аналогичным образом параметры пластины рассчитываются для подложки FR-4 с $\epsilon_r = 4,3$ с использованием вышеприведенных уравнений. Здесь мы использовали $h = 1,6$ мм.

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение параметров пластины для различных материалов подложки

Параметры пластины (патча)	RT Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2,2$)	FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$)
Длина L , мм	45	64
Ширина W , мм	58	72

Из всего вышесказанного следует, что подложка с низкой диэлектрической проницаемостью приводит к большему размеру антенны. Поэтому для конструкции микрополосковой антенны в основном выбирается подложка с более высокой диэлектрической проницаемостью.

Результаты моделирования

В данной работе антенна моделируется с двумя различными диэлектрическими подложками – RT Duroid 5880 и FR-4. Результаты моделирования получены с использованием программы HFSS. Для анализа использованы такие параметры антенны, как обратные потери S_{11} , полосу пропускания, усиление и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) [8]. На рис. 2 показана микрополосковая патч-антенна, смоделированная в программе HFSS.

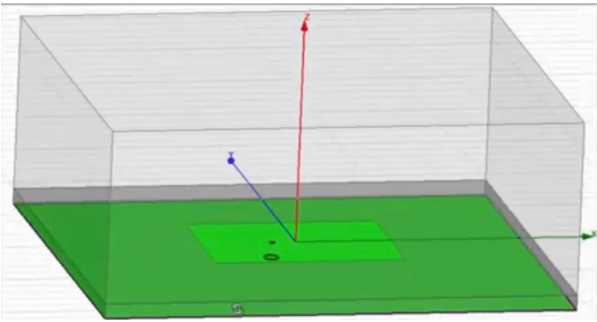


Рис. 2. Смоделированная микрополосковая патч-антенна

Обратные потери

Резонансная частота определяется как частота, на которой обратные потери имеют минимальное значение. Полоса пропускания антенны определяется как диапазон частот, в котором значение обратных потерь S_{11} не превышает -10 дБ. Значение $S_{11} = -10$ дБ соответствует коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН), равному 2, что считается приемлемым. Для RT Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2,2$) обратные потери $-18,73$ дБ, также можно увидеть, что для подложки FR-4 обратные потери составляют $-27,22$ дБ.

Из рис. 3 видно, что предлагаемая антенна с диэлектрической подложкой FR-4 резонирует в двух различных диапазонах частот – $1,22$ ГГц и $1,565$ ГГц, а соответствующие обратные потери составляют $-10,01$ дБ и $-27,22$ дБ соответственно.

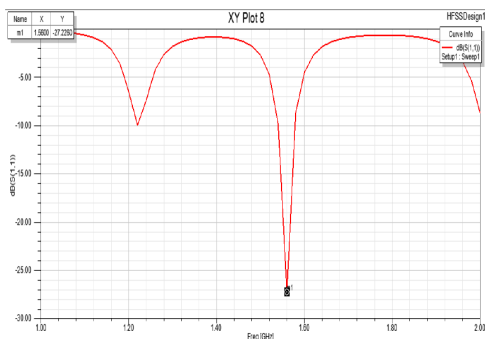


Рис. 3. График зависимости обратных потерь от частоты для FR-4

На рис. 4 показан график обратных потерь от частоты для прямоугольной патч-антенны с подложкой RT Duroid. Антенна будет резонировать в двух различных диапазонах частот $1,39$ ГГц и $1,565$ ГГц с обратными потерями -9 дБ, $-18,73$ дБ соответственно.

КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению)

На рис. 5 и 6 показана линия измерения для резонансной частоты, которая используется для GPS и других беспроводных систем, поскольку предлагаемая антенна резонирует в многополосном диапазоне частот.

Исходя из рис. 6, можно сказать, что антенна имеет хорошее согласование импеданса на частоте $1,565$ ГГц, поскольку КСВН для нее составляет $0,756$.

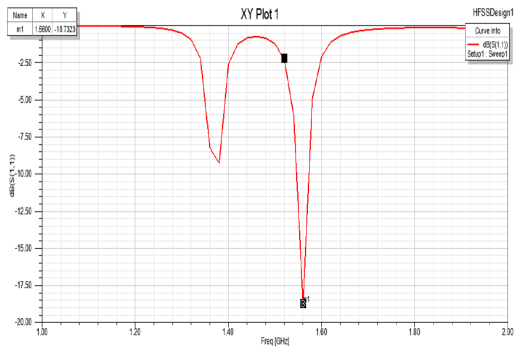


Рис. 4. График зависимости обратных потерь от частоты для RT Duroid 5880

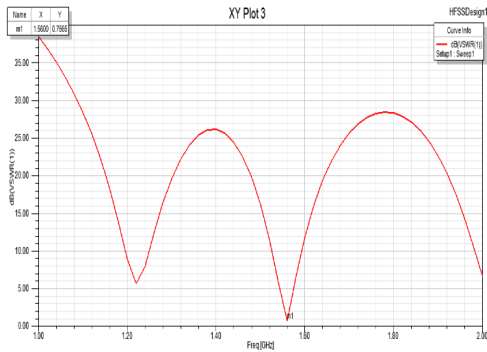


Рис. 5. График КСВН для подложки FR-4

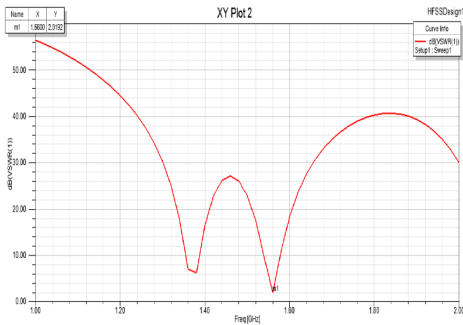


Рис. 6. График КСВН для подложки RT Duroid 5880

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования

Параметры	Обратные потери S_{11} , дБ	КСВН	Коэффициент усиления, дБ
FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$)	-27,22	0,756	0,62
RT Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2,2$)	-18,73	1,902	4,11

Заключение

Микрополосковая патч-антенна спроектирована и смоделирована с использованием программы HFSS. Анализ проводится на двух разных диэлектрических подложках, а именно FR-4 и RT Duroid 5880. В предлагаемой модели диапазон GPS получен для антенны, в которой выбрана подложка RT Duroid 5880, она дает лучшую эффективность с точки зрения обратных потерь (-27,22 дБ), усиления (4,11 дБ), по сравнению с антенной, разработанной с использованием FR-4. Антенна будет резонировать в многополосной частоте, которая включает нашу исследовательскую частоту 1,565 ГГц. Таким образом, она применима к GPS и другим беспроводным системам.

Список использованных источников и литературы

1. *Balanis, C. A.* Antenna Theory, Analysis and Design. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2005. – 1072 p. – ISBN: 0-471-66782-X.
2. *Pozar, D. M.* Microwave Engineering. – 4th ed. – John Wiley & Sons, 2012. – 736 p.
3. Microstrip Antenna Design Handbook / R. Garg, I. Bahl, A. Ittipiboon, P. Bhartia. – Artech House Inc., Norwood, MA, 2001. – 846 p.
4. *Rathod, J. M.* Comparative study of microstrip patch antenna for GPS application // International Journal of Innovation. – 2010. – Vol. 1, no. 2.
5. *Wu, W.* Design of an efficient X-band waveguide-fed microstrip patch array / W. Wu, J. Yin, N. Yuan // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2007. – Vol. 55, no. 7. – Pp. 1933-1939. – DOI: 10.1109/TAP.2007.900171.
6. *Kashyap, S. S.* Design and development of microstrip patch antenna for 2.4 GHz / S. S. Kashyap, B. Saisandeep // International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2012. June.
7. *Пластиков, А. Н.* Проектирование планарной антенной решетки диапазона L1 для систем GPS/ГЛОНАСС. – Москва : Нац. исследоват. ун-т МЭИ, 2012. – 24 с.
8. *Слюсар, В. И.* Цифровые антенные решетки: решения задач GPS // Электроника: НТБ. – 2009. – № 1. – С. 74–78.

A. N. Kopysov ^{✉ a}, CSc in engineering, assoc. prof.

D. S. Bakhmurnov ^{✉ b}, master student

E-mail: ^a kan_kan@istu.ru, ^b bahmurnov.danil@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development of a Microstrip Patch Antenna for Use in GPS Navigation System

The ever-increasing demand for communication equipments requires an efficient small-sized antenna design for GPS frequency band. Due to various advantages such as compact size, easy integration, low cost etc., microstrip antenna has found wide application in communication systems. Herein, we report a study of a microstrip patch antenna for GPS using probe feed method. The analysis is carried out on two different substrates namely FR-4 and RT Duroid 5880 with permittivity of 4.3 and 2.2 respectively. The antenna is modeled using HFSS 2014 and the antenna parameters such as return loss, VSWR, gain, bandwidth will be analyzed. The design procedure of microstrip patch antenna for GPS system is illustrated.

Keywords: GPS, VSWR, return loss, microstrip antenna.

УДК 004.432.2*М. А. Максимов*^{✉^a}, студент*В. А. Сидорина*^{✉^b}, канд. пед. наук, доц.E-mail: ^a maksimovmatvey2005@gmail.com, ^b vasidorina@mail.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Обзор оптимизаций компиляторов для языка программирования C++

Статья посвящена разбору оптимизаций, предпринимаемых компиляторами при сборке исполняемых файлов или библиотек, написанных на языке программирования C++. В работе дан краткий обзор флагов, влияющих на уровень оптимизации в выходном файле, а также подведены итоги того, какие опции лучше использовать.

Ключевые слова: C++, GCC, LLVM, оптимизация компиляторов, обзор флагов.

Введение

В настоящее время для создания программных кодов используется множество интегрированных сред разработки, компиляторов и языков программирования. Одним из популярных языков программирования является C++, разработанный в 1983 году как расширение языка C [1]. Несмотря на то, что с первого коммерческого выпуска прошло более 41 года, этот язык все ещё остается широко распространенным. По статистике, взятой с индекса TIOBE за февраль 2024 года, C++ по популярности занимает третье место, уступая только языкам C и Python [2].

Обзор оптимизации компиляторов для языка программирования C++ является важным аспектом в процессе создания программных проектов. Программы, написанные на C++, известны своей эффективностью и производительностью. Но, по умолчанию, при компиляции создается не оптимизированный файл. Это связано с тем, что при разработке гораздо важнее иметь отладочную информацию, чем полностью оптимизированный файл. Однако при опубликовании файлов их необходимо оптимизировать, так как для конечного пользователя гораздо важнее получить лучшую производительность.

Постановка задачи

Примерами оптимизирующих компиляторов являются GCC (GNU Compiler Collection) с функцией включения различных уровней оптимизации, например, -O1, -O2, -O3, -Ofast и поддержка специфичных оптимизаций для архитектур и платформ; Clang/LLVM (Low Level Virtual Machine) с модулярной архитектурой и возможностью оптимизации, поддержкой статического анализа и улучшений на уровне кода; MSVC (Microsoft Visual C++) с характерной оптимизацией и настройкой, а также специфичными для Microsoft Windows оптимизациями.

Для оптимизации рассмотрены флаги компиляторов в проектах GCC и LLVM, так как они являются одними из популярнейших компиляторов, которые поддерживают множество операционных систем [3]. Сюда входят российские операционные системы на базе ядра Linux, которые в последнее время активно развиваются.

Решение задачи

Рассмотрим все флаги, влияющие на оптимизацию результирующего файла в различных компиляторах. В документации проекта GCC определены множество опций [4].

Множество этих флагов сгруппированы в группы с префиксом -O. Использование флагов приводит к тому, что компиляция занимает больше времени, памяти. В особенности это происходит на высоких уровнях оптимизации [4].

Существует 8 уровней оптимизации. За исключением нулевого уровня, каждый активирует несколько дополнительных флагов оптимизации. Любой из нумерованных уровней (0, 1, 2, 3) включает все флаги, использующиеся на предыдущем уровне.

Ниже рассмотрен и показан каждый из уровней оптимизации:

- уровень -O0 отключает оптимизацию полностью и является уровнем по умолчанию. Это сокращает время компиляции и, совместно с флагом -g, генерирует отладочную информацию. Этот флаг не рекомендуется использовать при генерации финальной сборки проекта;
- уровень -O1 является наиболее простым уровнем оптимизации. Компилятор пытается сгенерировать быстрый, занимающий меньше объема, код, не затрачивая значительного времени на компиляцию;
- уровень -O2 является рекомендуемым уровнем оптимизации до тех пор, пока не потребуются чего-то специфичного. С этим уровнем компилятор пытается еще больше оптимизировать код без ущерба для объема результирующего файла;

– уровень `-O3` включает оптимизации, являющиеся дорогостоящими с точки зрения времени и памяти. Компиляция с уровнем `-O3` не является гарантированным способом повышения производительности и на самом деле во многих случаях ведет к ухудшению производительности из-за увеличенного результирующего кода. Параметр крайне не рекомендуется, так как многие программы могут не компилироваться или работают не стабильно;

– уровень `-Ofast` делает акцент на максимизации производительности результирующего файла, нарушая строгое следование стандарту. Он не рекомендуется для использования в финальных сборках;

– уровень `-Os` призван уменьшить объём генерируемого кода. Он активирует все флаги уровня `-O2`, которые не приводят к увеличению результирующего файла. Это может оказаться полезным на компьютерах с малым объемом пространства постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) или оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) или небольшим размером процессорного кэша;

– уровень `-Oz` является более агрессивным вариантом оптимизации по размеру, чем параметр `-Os`. Это может привести к снижению производительности, так как для сокращения размера файла будет применяться меньше инструкций;

– уровень `-Og` удовлетворяет потребность в быстрой компиляции и имеет превосходные возможности для отладки, обеспечивая при этом приемлемый уровень производительности во время выполнения. Является рекомендуемым уровнем для отладки кода.

Отдельно стоит определить ещё ряд опций, не входящих в предыдущие уровни оптимизации [5]. Так, опция `-march` является наиболее значительным параметром при оптимизации программы. Она сообщает компилятору, для какой архитектуры процессора генерировать код. Различные процессоры имеют различные возможности, поддерживают различные наборы команд и обладают разными способами исполнения кода.

Опция `-flto` является важным флагом, способным значительно улучшить производительность. Эта опция активирует Link Timed Optimization (LTO), обозначающий класс оптимизаций, выполняемых во время линковки (фазы компиляции, во время которой происходит объединение объектных файлов в единый результирующий файл). Суть этой оптимизации заключается в том, что компилятор оттягивает момент линковки, пока не будут скомпилированы все объектные файлы. Это позволяет задействовать больше оптимизаций и лучше их применять.

Преимуществом LTO [6] является двузначный прирост производительности для многих программ и снижение потребления памяти во время выполнения программы.

Из недостатков можно отметить [6] увеличение времени компиляции в 2–3 раза, использование больше памяти. Кроме того, при использовании LTO повышается вероятность появления ошибок во время сборки и исполнения, не все программы начинают работать быстрее.

А теперь перейдем к сравнению проектов GCC и LLVM.

Одна из целей clang, компилятора проекта LLVM, – быть совместимым с кодом, написанным в качестве целевого компилятора с использованием GCC, что обозначает совместимость уровней оптимизации разных проектов. Однако применение clang для компиляции всех программ и библиотек может увенчаться неудачей, так как часть пакетов невозможно скомпилировать с помощью clang.

Рассмотрим важные отличия LLVM по сравнению с GCC [7]. Наиболее влияющее отличие GCC от clang – вложенные функции. Это небольшое, но важное препятствие для полного перехода на стек LLVM/clang. Вложенные функции являются специфичными для GCC расширением и не стандартны в C. Это основная проблема, из-за которой LLVM не может скомпилировать библиотеку glibc, хотя в настоящее время ведется активная работа по написанию альтернативной цепочки инструментов glibc.

GCC по умолчанию использует флаг `-ftrapping-math`, а LLVM устанавливает значение `-fno-trapping-math`. Pixman является замечательным примером различия, вызывающего сбой фазы компиляции при использовании LLVM.

Стоит также отметить ряд замечаний при использовании LTO совместно с LLVM. Clang поддерживает два режима работы. Первый режим Full LTO, который является традиционным подходом и используемым в GCC, анализирует весь блок ссылок. Использовать его больше не рекомендуется.

Второй режим Thin LTO, в котором блок ссылок сканируется и разбивается на несколько частей. Здесь конечные блоки компиляции содержат только код, соответствующий текущей области видимости, что ускоряет компиляцию, уменьшает занимаемый объем и обеспечивает лучший параллелизм практически без затрат. Для использования необходимо передать флаг `-flto=thin`.

Выводы

В результате обзора оптимизаций, предпринимаемых компиляторами при сборке исполняемых файлов или библиотек, написанных на языке программирования C++, был проведен анализ флагов. В работе рассмотрен и показан каждый из уровней оптимизации.

Список использованных источников и литературы

1. *Болотнов, А. М.* Влияние оптимизации компилятора GCC на эффективность программного кода в языке C++ / А. М. Болотнов, Э. А. Нурисламова // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 12-2. – С. 266–270. – DOI 10.17513/snt.37869. – EDN АНХUIH.
2. TIOBE Index. – URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (дата обращения: 03.03.2024).
3. *Sibony, J.* Top C++ Compilers // Incredibuild Software Ltd. – Дата размещения: 19.08.2021. – URL: <https://www.incredibuild.com/blog/top-c-compilers> (дата обращения: 27.09.2024).
4. *Stallman, R. M.* Using the GNU Compiler Collection. For GCC version 13.2.0. – Boston, USA : GNU Press, 01.08.2024. – 1077 p.
5. LTO // Gentoo Wiki. – URL: <https://wiki.gentoo.org/wiki/LTO> (дата обращения: 14.03.2024).
6. GCC optimization // Gentoo Wiki. – URL: https://wiki.gentoo.org/wiki/GCC_optimization (дата обращения: 13.03.2024).
7. Clang // Gentoo Wiki. – URL: <https://wiki.gentoo.org/wiki/Clang> (дата обращения: 26.09.2024).

M. A. Maksimov ^{✉ a}, student

V. A. Sidorina ^{✉ b}, CSc in pedagogics, assoc. prof.

E-mail: ^a maksimovmatvey2005@gmail.com, ^b vasidorina@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Overview of Compiler Optimizations for the C++ Programming Language

This article is devoted to the analysis of optimizations undertaken by compilers when building executable files or libraries written in the C++ programming language. The paper provides a brief overview of the flags that affect the level of optimization in the output file, as well as summarizes which options are better to use.

Keywords: C++, GCC, LLVM, compiler optimization, flag overview.

УДК: 621.373.54

Д. С. Махнёв, магистрант

И. К. Бобров, магистрант

Е. Г. Булатова , канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: buleg61@mail.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Моделирование автоколебательного блокинг-генератора для получения импульсов прямоугольной формы

Рассмотрен принцип работы автоколебательного блокинг-генератора, его применение в электронных устройствах и влияние на выходные характеристики схем. Проведено моделирование автоколебательного блокинг-генератора на основе транзистора, на выходе получены импульсы прямоугольной формы.

Ключевые слова: источник напряжения, блокинг-генератор, прямоугольные импульсы, моделирование.

Введение

В наше время электронные приборы занимают важное место в жизни людей и применяются в самых разных сферах. С их помощью автоматизируют процессы, обеспечивают связь, обрабатывают информацию и решают другие задачи. Одним из ключевых элементов таких устройств является автоколебательный блокинг-генератор, который, как правило, применяется в радиотехнике и электронике для формирования импульсов малой длительности и большой скважности [1]. Однако работа блокинг-генератора очень похожа на работу импульсного обратного преобразователя напряжения. В обеих схемах есть транзистор, который периодически подключает индуктивность к источнику напряжения, за счет чего индуктивность накапливает энергию, а затем, когда он размыкает цепь, накопленная в индуктивности энергия передается в нагрузку или рассеивается демпферной цепью в случае блокинг-генератора без нагрузки. Использование блокинг-генератора в импульсном источнике питания упрощает схему последнего устройства и как следствие снижает его стоимость.

Блокинг-генераторы могут работать как в ждущем режиме (ждущий блокинг-генератор), так и в автоколебательном (автоколебательный

блокинг-генератор) [1, 2]. Ждущий блокинг-генератор находится в состоянии покоя до тех пор, пока на его вход не поступит запускающий импульс. После этого он генерирует одиночный импульс заданной длительности и возвращается в состояние покоя. Этот режим работы используется для создания импульсов по запросу. Автоколебательный блокинг-генератор постоянно генерирует импульсы без внешнего запускающего сигнала. Он работает в режиме самовозбуждения и используется для генерации периодических импульсов.

Постановка задачи

Необходимо смоделировать автоколебательный блокинг-генератор для получения на выходе импульсов, наиболее близких к прямоугольной форме.

Решение задачи

Для формирования прямоугольных импульсов, которые необходимы для запуска микропроцессора и синхронизации его работы, нами был выбран автоколебательный блокинг-генератор, схема которого реализована на основе транзистора. Прямоугольные импульсы задают временные интервалы, в течение которых выполняются различные операции микропроцессора. Это обеспечивает согласованность работы всех блоков микропроцессорной системы и позволяет выполнять сложные вычисления и обработку данных.

Автоколебательный блокинг-генератор (рис. 1) включает в себя: транзистор, подключенный по схеме с общим эмиттером, трансформатор обратной связи, демпфирующую цепь в виде диода, времязадающую цепочку $R2C1$, базовый резистор $R1$ и сопротивление нагрузки.

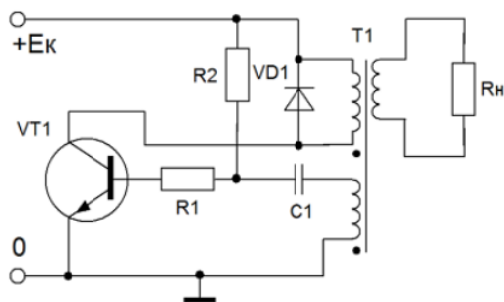


Рис. 1. Схема автоколебательного блокинг-генератора

Рассмотрим работу блокинг-генератора на основе временных диаграмм, которые представлены на рис. 2.

В начальный момент времени t_0 транзистор закрыт. После подачи питания конденсатор начинает заряжаться через резистор. На отрезке времени от t_0 до t_1 происходит постепенное открытие транзистора и увеличение коллекторного тока I_c . В момент времени t_1 транзистор полностью переходит в режим насыщения.

В интервале от t_1 до t_2 конденсатор разряжается, из-за чего напряжение на базе транзистора снижается, следовательно, это приводит к уменьшению тока базы I_b . По мере снижения тока базы I_b уменьшается и ток коллектора I_c , но поскольку нагрузка на коллекторе имеет индуктивные характеристики, начинается рост тока намагничивания трансформатора. В результате коллекторный ток транзистора I_c увеличивается, и напряжение на коллекторе остается стабильным в течение некоторого времени.

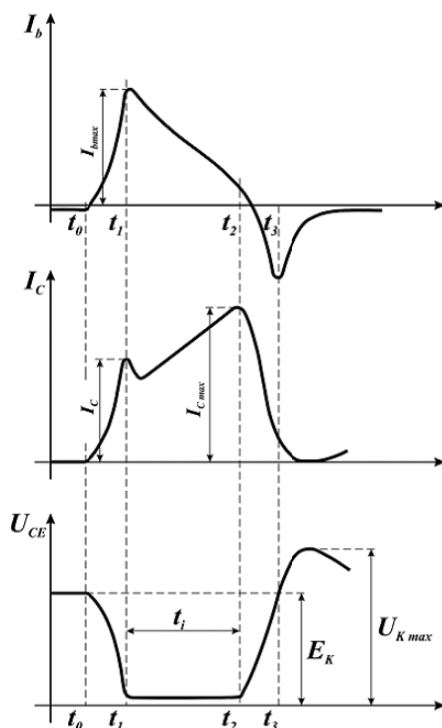


Рис. 2. Временные диаграммы работы автоколебательного блокинг-генератора

В момент времени t_2 ток I_b , вызванный индукцией, снижается, что приводит к постепенному закрытию транзисторного ключа из-за разрядки конденсатора. Во временном интервале от t_2 до t_3 на базе возникает отрицательный скачок напряжения. Это обусловлено тем, что, когда транзистор полностью закроется в обмотках трансформатора возникнет ток, обратный току коллектора I_c и, соответственно, току базы I_b , что приведет к еще более быстрой разрядке конденсатора и формированию отрицательного всплеска напряжения на базе.

В момент времени t_3 транзистор полностью закрыт. В этот период рассеивается энергия, запасенная в конденсаторе и трансформаторе. В трансформаторе могут возникнуть колебательные процессы (изменение напряжения до уровня U_{kmax}), что в общем случае является нежелательным, поэтому для предотвращения этого используется диод [2].

Результаты разработки и моделирования

Выбранный автоколебательный блокинг-генератор был смоделирован в программе Multisim [3] (рис. 3). Для сборки автоколебательного блокинг-генератора использовались: источник постоянного напряжения 12 В, три резистора номиналами $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 80$ кОм, конденсатор номиналом $C_1 = 1000$ нФ, диод 1ВН62, транзистор 2Т222А, трансформатор Т1. Для запуска работы схемы использован генератор XFG1 разных форм сигналов, а для получения результатов на выходе использован осциллограф XSC1.

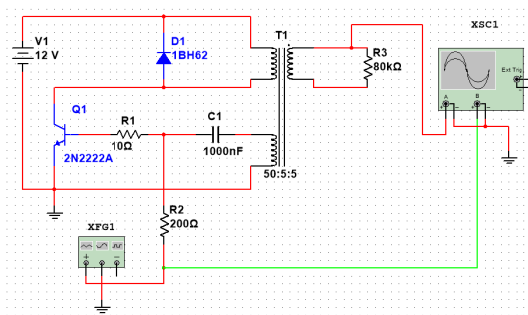


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема автоколебательного блокинг-генератора на основе транзистора, смоделированная в программе Multisim

На рис. 4 зеленым цветом представлен гармонический сигнал частотой 16 Гц, запускающий работу схемы автоколебательного блокинг-генератора, а красным цветом представлены импульсы прямоугольной формы, получающиеся в результате работы схемы.

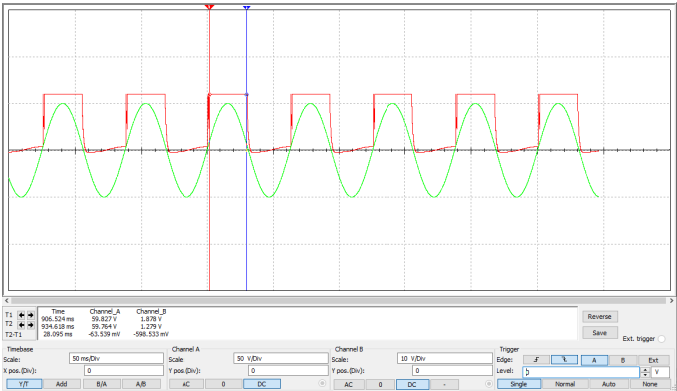


Рис. 4. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска синусоидальным сигналом частотой 16 Гц

На рис. 5 зеленым цветом представлен пилообразный сигнал частотой 16 Гц, запускающий работу схемы автоколебательного блокинг-генератора, а красным цветом представлены импульсы прямоугольной формы, получающиеся в результате работы схемы.

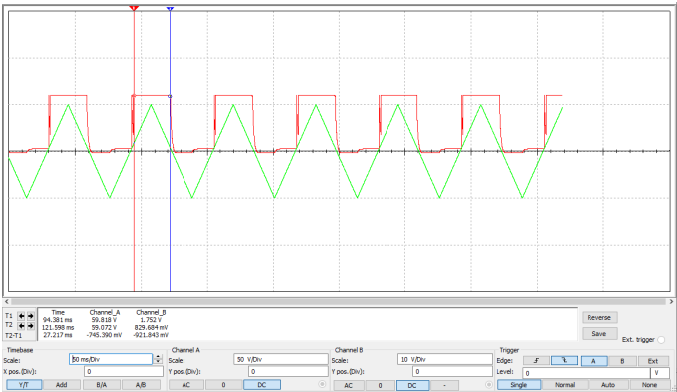


Рис. 5. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска пилообразным сигналом частотой 16 Гц

На рис. 6 зеленым цветом представлен сигнал прямоугольной формы частотой 16 Гц, запускающий работу схемы автоколебательного блокинг-генератора, а красным цветом представлены импульсы, получающиеся в результате работы схемы.

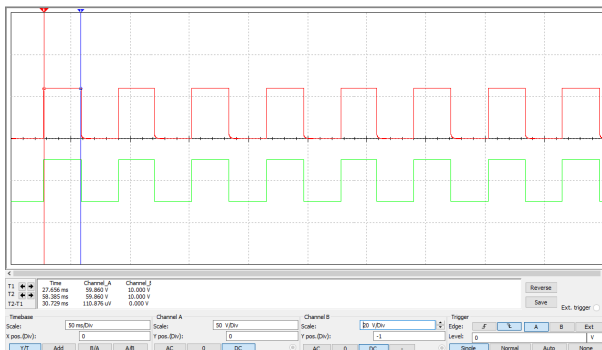


Рис. 6. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска сигналом прямоугольной формы частотой 16 Гц

Из рис. 4-6 видно, что во всех случаях форма импульсов на выходе автоколебательного блокинг-генератора получается прямоугольной, но менее всего искажений на выходе наблюдается при запуске схемы сигналом прямоугольной формы.

На рис. 7–9 зеленым цветом представлены синусоидальные сигналы частотой 20, 28 и 35 Гц соответственно, которые запускают работу схемы автоколебательного блокинг-генератора, а красным цветом представлены импульсы прямоугольной формы, получающиеся в результате работы схем. Как видно из графиков, с ростом частоты искажения импульсов увеличиваются.

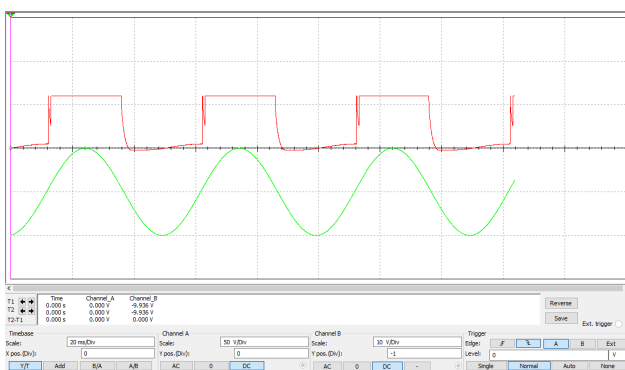


Рис. 7. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска сигналом синусоидальной формы частотой 20 Гц

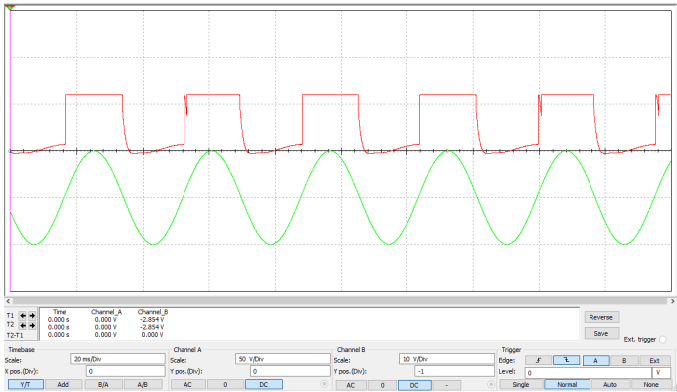


Рис. 8. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска сигналом синусоидальной формы частотой 28 Гц

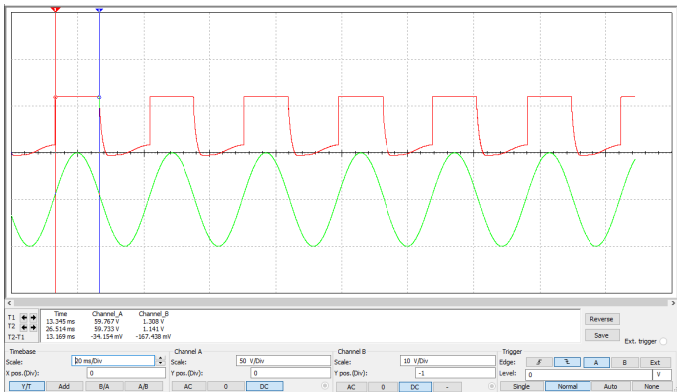


Рис. 9. График, полученный на выходе схемы автоколебательного блокинг-генератора в результате его запуска сигналом синусоидальной формы частотой 35 Гц

Выводы

Анализ схем блокинг-генераторов привел к тому, что был выбран автоколебательный блокинг-генератор. В программе Multisim было проведено моделирование автоколебательного блокинг-генератора, реализованного на основе транзистора.

По результатам исследования можно сделать выводы:

- 1) форма импульсов на выходе автоколебательного блокинг-генератора получается прямоугольной при запуске сигналом любой формы;
- 2) форма прямоугольных импульсов менее всего искажена на выходе при запуске схемы сигналом прямоугольной формы;
- 3) с ростом частоты искажения формы прямоугольных импульсов увеличиваются;
- 4) для достижения желаемой формы выходного сигнала с наименьшими искажениями необходимы дальнейший анализ и исследования.

Список используемых источников и литературы

1. *Браммер, Ю. А.* Импульсные и цифровые устройства : учеб. для студентов электрорадиоприборостроительных сред. спец. учеб. заведений / Ю. А. Браммер, И. Н. Пашук – Москва : Высш. шк., 2003. – 351 с.
2. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В. И. Бойко, А. Н. Гуржий, В. Я. Жуйков, А. А. Зори, В. М. Спивак. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
3. *Гололобов, В. Н.* Схемотехника с программой Multisim для любознательных. – Санкт-Петербург : Наука и техника, 2019. – 272 с.

D. S. Makhnev, master student

I. K. Bobrov, master student

E. G. Bulatova ✉, CSc in phys. and math., assoc. prof.

E-mail: buleg61@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Simulation of a Self-Oscillating Blocking Generator for Receiving Rectangular Pulses

In this paper, the principle of operation of the self-oscillating blocking generator, its application in electronic devices and its effect on the output characteristics of circuits are considered. A self-oscillating blocking generator based on a transistor was simulated and rectangular pulses were obtained at the output.

Keywords: voltage source, blocking generator, rectangular pulses, modeling.

УДК 537.876

Д. В. Нельдихин ^{✉^a}, студент
В. А. Сидорина ^{✉^b}, канд. пед. наук, доц.
E-mail: ^a danil.neldikhin@yandex.ru, ^b vasidorina@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Анализ математической модели проводимости электромагнитных волн в проводниках и диэлектриках

В статье представлен математический анализ проводимости электромагнитных волн в проводниках и диэлектриках. Особое внимание уделено определению комплексной диэлектрической проводимости, а также вычислению коэффициента распространения.

Ключевые слова: электромагнитная волна, проводимость, диэлектрическая проницаемость, коэффициент распространения.

Введение

В современном мире все активнее применяются способы передачи информации с помощью электромагнитных волн (ЭМВ), вследствие чего появилась необходимость углубленного понимания их поведения при прохождении через различные материалы для дальнейшего использования в радиотехнических задачах.

Цель данной работы – выполнить математический анализ проводимости электромагнитных волн в проводниках и диэлектриках. Особое внимание уделено определению комплексной диэлектрической проницаемости и коэффициента распространения, которые являются ключевыми параметрами для описания электродинамических свойств материалов.

Постановка задачи

Задача разделена на два этапа. На первом этапе необходимо определить комплексную диэлектрическую проницаемость и коэффициент распространения электромагнитных волн, которые являются ключевыми параметрами для описания их поведения в различных средах. На втором этапе проводится анализ распространения электромагнитных

волн в различных типах материалов, таких как идеальный диэлектрик и проводник, для выявления особенностей их взаимодействия с каждым из этих материалов.

Решение задачи

Для начала анализа необходимо определить комплексную диэлектрическую проницаемость электромагнитной волны.

Воспользуемся уравнением Максвелла, где:

- σ – проводимость материала;
- $\dot{\mathbf{E}}$ – напряженность электрического поля;
- $\dot{\mathbf{H}}$ – напряженность магнитного поля;
- $\dot{\mathbf{D}}$ – электрическое смещение;
- $\dot{\mathbf{B}}$ – магнитная индукция;
- ω – циклическая частота;
- $\tilde{\epsilon}_a$ – комплексная диэлектрическая проницаемость.

$$\text{rot } \dot{\mathbf{H}} = \sigma \dot{\mathbf{E}} + j\omega \dot{\mathbf{D}} + j_{\text{ст}} = \sigma \dot{\mathbf{E}} + j\omega \epsilon_a \dot{\mathbf{E}} + j_{\text{ст}} = j\omega \dot{\mathbf{E}} \left(-j \frac{\sigma}{\omega} + \epsilon_a \right) + j_{\text{ст}}, \quad (1)$$

$$\text{rot } \dot{\mathbf{H}} = j\omega \tilde{\epsilon}_a \dot{\mathbf{E}} + j_{\text{ст}}. \quad (2)$$

Рассмотрим подробнее:

$$\tilde{\epsilon}_a = -j \frac{\sigma}{\omega} + \epsilon_a = \epsilon_a - j \frac{\sigma}{\omega}. \quad (3)$$

Разделим уравнение на две составляющие – мнимую и естественную. Получим:

$$\tilde{\epsilon}_a = \epsilon' + \epsilon''. \quad (4)$$

Действительная часть ϵ' , равная ϵ_a , описывает, насколько материал может накапливать энергию, то есть способность к поляризации [1].

Мнимая часть ϵ'' , равная $-j \frac{\sigma}{\omega}$, описывает потери из-за проводимости. Это связано с тем, что при переменных токах проводимый материал вызывает потерю энергии в виде тепла (диэлектрические потери).

Проводимость материала связана с удельным сопротивлением следующим отношением:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (5)$$

Подытожим: формула учитывает накопление энергии в поле и ее рассеяние в виде тепла. Чем выше проводимость материала σ или частота ω , тем больше потерь будет в материале.

Найдем коэффициент распространения ЭМВ.

Для этого будем использовать уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\text{rot}\dot{\mathbf{H}} = jw\tilde{\epsilon}_a\dot{\mathbf{E}}, \quad (6)$$

$$\text{rot}\dot{\mathbf{E}} = -jw\mu_a\dot{\mathbf{H}}, \quad (7)$$

$$\text{div}\dot{\mathbf{E}} = 0, \quad (8)$$

$$\text{div}\dot{\mathbf{H}} = 0. \quad (9)$$

Условимся, что источников полей нет, среда однородная, тогда $Q = 0$ – свободные заряды, $j_{\text{св}} = 0$.

Тогда уравнение Максвелла примет вид:

$$\text{rot}\dot{\mathbf{H}} = jw\tilde{\epsilon}_a\dot{\mathbf{E}}, \quad \text{rot}\dot{\mathbf{E}} = -jw\mu_a\dot{\mathbf{H}}, \quad (10)$$

$$\text{div}\dot{\mathbf{D}} = Q = 0, \quad \text{div}\dot{\mathbf{B}} = 0, \quad (11)$$

$$\text{div}\dot{\mathbf{E}} = 0, \quad \text{div}\dot{\mathbf{H}} = 0, \quad (12)$$

Пояснение: $\text{div}\dot{\mathbf{D}} = \text{div}\epsilon_a\dot{\mathbf{E}} = 0$, так как $\text{div}\dot{\mathbf{E}} = 0$.

Возьмем

$$\begin{aligned} \text{rot}(\text{rot}\dot{\mathbf{H}}) &= \text{rot}(jw\tilde{\epsilon}_a\dot{\mathbf{E}}) = \text{rot}\dot{\mathbf{E}} * jw\tilde{\epsilon}_a = jw\tilde{\epsilon}_a(-jw\mu_a\dot{\mathbf{H}}) = \\ &= w^2\tilde{\epsilon}_a\mu_a\dot{\mathbf{H}} = \gamma^2\dot{\mathbf{H}}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\gamma = w\sqrt{\tilde{\epsilon}_a\mu_a} = \beta - j\alpha, \quad (14)$$

где γ – коэффициент распространения; β – фазовый коэффициент; α – коэффициент потерь.

На втором этапе рассмотрим характеристики волны в разных средах.

1. Идеальный диэлектрик.

Рассмотрим идеальную среду, где электромагнитные волны распространяются без затухания: $\alpha = 0$; $\gamma = \beta = w\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu_0}$ [2].

Для такой среды волновое число (фазовая постоянная) зависит от угловой частоты w , диэлектрической проницаемости ϵ и магнитной проницаемости μ_0 :

$$v_\phi = \frac{w}{\beta} = \frac{w}{w\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}. \quad (15)$$

Фазовая скорость волны в среде уменьшается по сравнению со скоростью света c в вакууме и зависит от диэлектрической проницаемости ϵ :

$$c = \frac{1}{\mu_0\epsilon_0}. \quad (16)$$

$$\lambda \cdot f = v_\varphi; \quad \lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon}}. \quad (17)$$

В формуле (17) f измеряется в герцах (Гц), определяет частоту ЭМВ.

В идеальных диэлектриках, как показано в формулах, отсутствует коэффициент поглощения, $\alpha = 0$, это означает, что ЭМВ не теряют свою энергию при распространении через материал. Это делает их идеальной средой для распространения волн.

2. Проводник

В проводнике коэффициент затухания $\alpha \neq 0$, что означает, что электромагнитные волны при прохождении через проводник сильно затухают [3]. Затухание определяется формулой:

$$\gamma = w\sqrt{\tilde{\varepsilon}_a\mu_a}, \quad \tilde{\varepsilon}_a = \varepsilon_a - j\frac{\sigma}{w}, \quad \varepsilon_a \ll \frac{\sigma}{w}, \quad (18)$$

$$\gamma = w\sqrt{-j\frac{\sigma}{w}\mu_a} = \sqrt{-jw\sigma\mu_a}, \quad (19)$$

$$\sqrt{-j} = \sqrt{e^{-j\frac{\pi}{2}}} = e^{-j\frac{\pi}{4}} = \cos\frac{\pi}{4} - j\sin\frac{\pi}{4} = \frac{1-j}{\sqrt{2}}. \quad (20)$$

После преобразований получим следующую формулу для коэффициента распространения:

$$\gamma = \sqrt{\frac{w\sigma\mu_a}{2}}(1-j) = \beta - j\alpha. \quad (21)$$

Из формулы видно, что

$$\beta = \alpha = \sqrt{\frac{w\sigma\mu_a}{2}}. \quad (22)$$

Из этого выражения следует, что в проводниках амплитуда волны убывает экспоненциально, а фаза изменяется синхронно с затуханием.

Длина волны в проводнике $\lambda_{\text{пр}}$ значительно меньше, чем длина волны в вакууме λ_0 , что связано с сильным затуханием электромагнитных волн:

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi\sqrt{\frac{2}{w\sigma\mu_a}} \ll \lambda_0. \quad (23)$$

Фазовая скорость электромагнитной волны в проводнике:

$$v_\varphi = \sqrt{\frac{2w}{\sigma\mu_a}}. \quad (24)$$

Этот результат показывает, что фазовая скорость волны в проводнике зависит от частоты ω , проводимости σ и магнитной проницаемости μ_a , и она значительно ниже скорости света в вакууме.

Глубина проникновения ЭМВ определяется:

$$d = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_a}}. \tag{25}$$

Это показатель того, насколько глубоко волна может проникнуть в материал, прежде чем ее амплитуда существенно ослабнет. В проводниках эта глубина невелика и измеряется в микрометрах.

На глубине скин-слоя снижение электрического поля и магнитного происходит в e раз:

$$\frac{I_x}{I_0} = e^{-x/d}. \tag{26}$$

Электромагнитные волны в проводниках испытывают сильное затухание, так как коэффициент затухания α отличается от нуля. Волновое число γ имеет комплексную природу, что приводит к экспоненциальному убыванию амплитуды волны и изменению фазы синхронно с затуханием. Длина волны в проводнике значительно меньше, чем в вакууме, а фазовая скорость волны ниже. Глубина проникновения волны в проводник невелика и определяется проводимостью и магнитной проницаемостью материала.

Использование данной модели позволило оценить толщину скин-слоя и фазовую скорость электромагнитной волны для различных материалов.

Таблица 1. Толщина скин-слоя в разных материалах

Металл	Проводимость $\sigma \cdot 10^7 \text{ См/м}$	Толщина скин-слоя d , мкм, на частотах, ГГц					
		0,2	0,5	1	2	4	10
Серебро	6,6	4,5	2,88	2,03	1,44	1,02	0,64
Медь	5,9	4,9	2,98	2,09	1,48	1,05	0,66
Золото	4,4	5,55	3,53	2,49	1,75	1,24	0,79
Олово	0,9	12,5	7,87	5,57	3,95	2,8	1,78

Таблица 2. Фазовая скорость ЭМВ в разных материалах

Металл	Фазовая скорость ЭМВ v_φ , м/с, на частотах, ГГц					
	0,2	0,5	1	2	4	10
Серебро	5504,9	8704	12309,3	17407,9	24618,5	38925,3
Медь	5822,3	9205,8	13018,9	18411,8	26037,9	41169,5
Золото	6742,1	10660,2	15075,8	21320,5	30151,7	47674
Олово	14907,1	23570,2	33333,3	47140,4	66666,6	105409

Выводы

Для проводников анализ комплексного волнового числа ($\gamma = \beta - j\alpha$) и разделение на действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости ($\epsilon' + j\epsilon''$) позволяют учитывать как накопление энергии, так и ее рассеяние в виде тепла. Это особенно важно для выбора материалов с высокими экранирующими свойствами, таких как металлы или композиты. Проводниковые материалы могут применяться для проектирования экранов, эффективно поглощающих электромагнитные волны.

В свою очередь, в идеальных диэлектриках отсутствует коэффициент поглощения, $\alpha = 0$, что означает, что электромагнитные волны не теряют свою энергию при распространении через материал. Это делает их идеальными для передачи волн, что можно эффективно использовать в диэлектрических оптоволоконных кабелях и волноводах, обеспечивая минимальные потери сигналов. Это особенно критично для высокочастотных систем передачи данных и связи, где эффективность и надежность передачи информации имеют первостепенное значение.

Список использованных источников и литературы

1. *Хабигер, Э.* Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер ; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
2. *Винников, В. В.* Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов : учеб. пособие / В. В. Винников. – Санкт-Петербург : Изд-во СЗТУ, 2006. – 164 с.
3. *Чернушенко, А. М.* Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А. М. Чернушенко, Б. В. Петров, Л. Г. Малорацкий и др. ; под ред. А. М. Чернушенко. – Москва : Радио и связь, 1990. – 352 с.

D. V. Neldikhin ^{✉ a}, student

V. A. Sidorina ^{✉ b}, CSc in pedagogics, assoc. prof.

E-mail: ^a danil.neldikhin@yandex.ru, ^b vasidorina@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Analysis of a Mathematical Model of the Effect of Electromagnetic Waves on Conductors and Dielectrics

This article presents a mathematical analysis of the interaction of electromagnetic waves on conductors and dielectrics. Special attention is paid to finding the complex dielectric conductivity, as well as finding the propagation coefficient.

Keywords: electromagnetic wave, conductivity, dielectric constant, propagation coefficient.

УДК 001.891.57

К. А. Никифоров^{✉^a}, студент
Е. Г. Булатова^{✉^b}, канд. физ.-мат. наук, доц.
E-mail: ^akostyanikiforov2@gmail.com, ^bbuleg61@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Сравнительный анализ переходных характеристик электрических цепей, полученных экспериментально и с использованием программы Micro-Cap

В статье исследованы возможности использования прикладной программы Micro-Cap для моделирования переходных характеристик электрических цепей в учебном процессе по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Был проведен сравнительный анализ переходных характеристик, смоделированных в программе Micro-Cap, с переходными характеристиками, полученными экспериментально.

Ключевые слова: сравнительный анализ, переходная характеристика, фильтр нижних частот, фильтр верхних частот.

Введение

В процессе обучения студентов по направлению 11.03.01 «Радиотехника» (профиль «Интеллектуальная радиотехника») необходимо сформировать следующую компетенцию: «Способен выполнять математическое моделирование объектов и процессов по типовым методикам, в том числе с использованием стандартных пакетов прикладных программ». В связи с этим важную роль играет практическая подготовка студентов для дальнейшего использования полученных навыков в своей профессиональной деятельности. Соответствующие компетенции студенты могут получить при выполнении лабораторных, курсовых работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

В связи со сложностями сборки реальных схем есть возможность моделировать эти схемы в различных Spice-программах. Но возникает вопрос, насколько они достоверно передают реальное поведение схем.

Постановка задачи

Необходимо провести сравнительный анализ переходных характеристик выбранных фильтров, полученных экспериментально, с характери-

стиками, полученными посредством моделирования в программе Micro-Cap 12.02.05.

Решение задачи

Рассмотрим RC-цепь, выходом которой служит емкость (рис. 1).

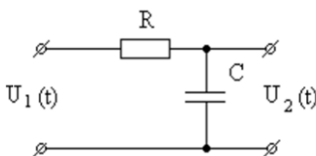


Рис. 1. RC-фильтр нижних частот

Передаточная функция по напряжению этой цепи:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_2(t)}{U_1(t)} = \frac{I(t) \cdot \frac{1}{j\omega C}}{I(t) \cdot \left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)} = \frac{1}{(j\omega CR + 1)}. \quad (1)$$

Или через оператор Лапласа $p = j\omega$:

$$K(p) = \frac{1}{(pCR + 1)} = \frac{1}{(p\tau_C + 1)}, \quad (2)$$

где $\tau_C = CR$ – постоянная времени RC-цепи.

Из полученного уравнения находим изображение переходной характеристики $a(p)$:

$$a(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{1}{p \cdot (p\tau_C + 1)} = \frac{\frac{1}{\tau_C}}{p \cdot \left(p + \frac{1}{\tau_C}\right)} = \frac{\alpha}{p \cdot (p + \alpha)}, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{1}{\tau_C}$.

Переходная характеристика $a(t)$ – это реакция цепи на единичное ступенчатое воздействие (рис. 2) при нулевых начальных условиях.

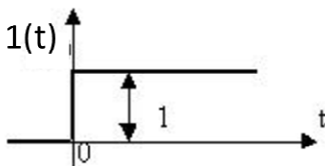


Рис. 2. График единичного ступенчатого воздействия

От изображения переходной характеристики перейдем к оригиналу функции согласно таблицам преобразования Лапласа:

$$\frac{\alpha}{p \cdot (p + \alpha)} \doteq (1 - e^{-\alpha t})1(t). \quad (4)$$

Таким образом, закон изменения переходной характеристики:

$$a(t) = (1 - e^{-\alpha t})1(t). \quad (5)$$

При $t = 0$ – функция $a(t) = 0$, а при $t \rightarrow \infty$ – функция $a(t) \rightarrow 1$.

Следовательно, закону изменения переходной характеристики соответствует кривая (рис. 3).

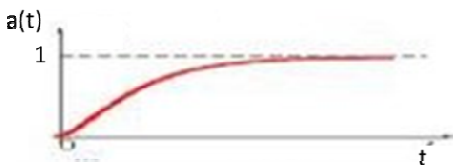


Рис. 3. Переходная характеристика RC-цепи

При большой постоянной времени, то есть при $p\tau_C \gg 1$, передаточная функция будет равна

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} \approx \frac{1}{p\tau_C}. \quad (6)$$

В идеальном интеграторе $U_2(t) = k \int U_1(t) dt$ или $U_2(p) = k \frac{U_1(p)}{p}$.

Таким образом, функция передачи в идеальном случае определяется соотношением:

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{k}{p}. \quad (7)$$

Из сравнения выражений (6) и (7) следует, что RC-цепь с большой постоянной времени может использоваться для приближенного математического интегрирования.

Форма сигналов на входе и выходе данной интегрирующей цепи представлена на рис. 4.

Таким образом, при подаче на вход цепи (рис. 1) сигналов прямоугольной формы выходное напряжение имеет пилообразную форму, если постоянная времени цепи большая по сравнению с длительностью входных сигналов. Следовательно, работа этой схемы сходна с математическим интегрированием.

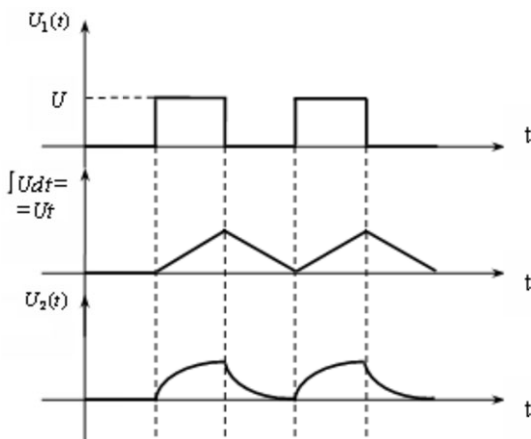


Рис. 4. Форма сигналов на входе и выходе интегрирующей цепи

Если рассмотреть RL-цепь, выходом которой служит резистор (рис. 5), то передаточная функция по напряжению этой цепи:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_2(t)}{U_1(t)} = \frac{I(t) \cdot R}{I(t) \cdot (R + j\omega L)} = \frac{1}{(1 + \frac{j\omega L}{R})}. \quad (8)$$

Или через оператор Лапласа $p = j\omega$:

$$K(p) = \frac{1}{(1 + p \frac{L}{R})} = \frac{1}{(1 + p \tau_L)}, \quad (9)$$

где $\tau_L = L/R$ – постоянная времени RL-цепи.

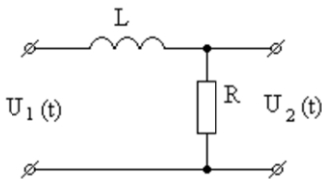


Рис. 5. RL-фильтр нижних частот

Из полученного уравнения находим изображение переходной характеристики $a(p)$:

$$a(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{1}{p \cdot (1 + p \tau_L)} = \frac{\frac{1}{\tau_L}}{p \cdot (p + \frac{1}{\tau_L})} = \frac{\alpha}{p \cdot (p + \alpha)}, \quad (10)$$

где $\alpha = 1/\tau_L$. Она имеет такой же вид, что и для рассмотренной RC-цепи, и является реакцией цепи на единичное ступенчатое воздействие (рис. 2) при нулевых начальных условиях.

Оригинал функции согласно таблицам преобразования Лапласа (4) имеет такой же вид, что и для RC-цепи.

Таким образом, и закон изменения переходной характеристики $a(t)$ имеет такой же вид (5), следовательно, закону изменения переходной характеристики соответствует такая же кривая (рис. 3).

При большой постоянной времени, то есть при $p\tau_L \gg 1$, передаточная функция будет равна

$$K(p) = \frac{U_2(t)}{U_1(t)} = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} \approx \frac{1}{p\tau_L}. \quad (11)$$

Таким образом, RL-цепь с выходом с R (рис. 5) также будет интегрирующей при большой постоянной времени цепи.

Для проведения сравнительного анализа были собраны фильтры нижних частот.

Моделирование в программе Micro-Cap выполняется посредством удобного интерфейса. При открытии программы сразу можно увидеть рабочее поле, на котором осуществляется построение электрической цепи. Главное меню находится в верхней части экрана, слева находится панель компонентов, все команды можно вызвать через меню.

Можно построить свою цепь, пользуясь панелью элементов. Для того чтобы создать цепь самостоятельно и провести ее анализ, нужно в главном меню выбрать «File», далее выбрать нужные элементы, расставить их на рабочем пространстве так, как вам нужно, в зависимости от того, какая у вас цепь. Затем с помощью инструмента «Wire» соединить все элементы между собой.

Для примера выберем простой RC-фильтр нижних частот, показанный на рис. 1.

Для сборки фильтра нижних частот использовались: резистор номиналом в 3 кОм и конденсатор номиналом 25 нФ, для фильтра верхних частот: резистор номиналом 3 кОм и катушка индуктивности номиналом в 100 мГн.

Для получения переходных характеристик сначала смоделировали RC-цепь (рис. 6). На рис. 7 представлена переходная характеристика данной RC-цепи, полученная путем моделирования в Micro-Cap при подаче на вход цепи напряжения прямоугольной формы.

На рис. 8–9 приведены переходные характеристики, полученные экспериментально на выходе резистора и конденсатора RC-цепи.

Экспериментальные исследования подтверждают результаты моделирования (рис. 7).

Далее смоделируем RL-цепь (рис. 10) для получения переходной характеристики. Переходная характеристика RL-цепи представлена на рис. 11.

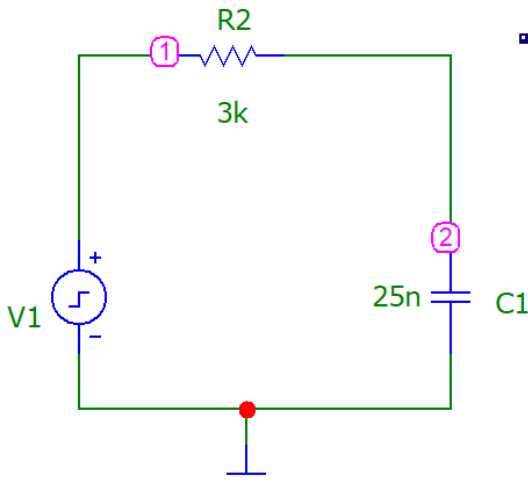


Рис. 6. RC-цепь фильтра нижних частот

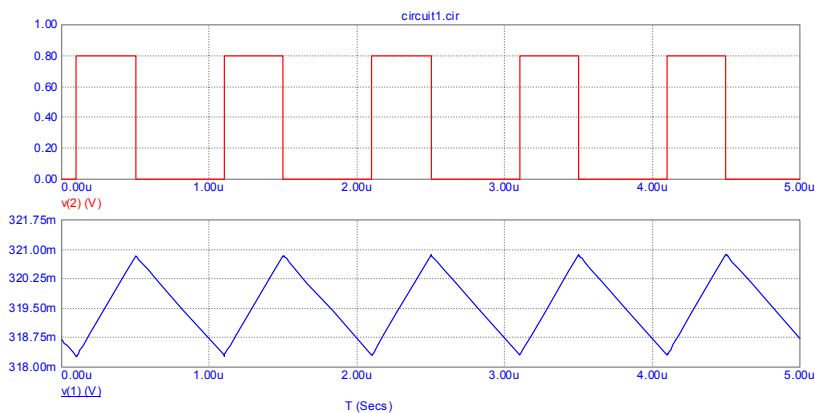


Рис. 7. Входной и выходной сигналы смоделированной RC-цепи

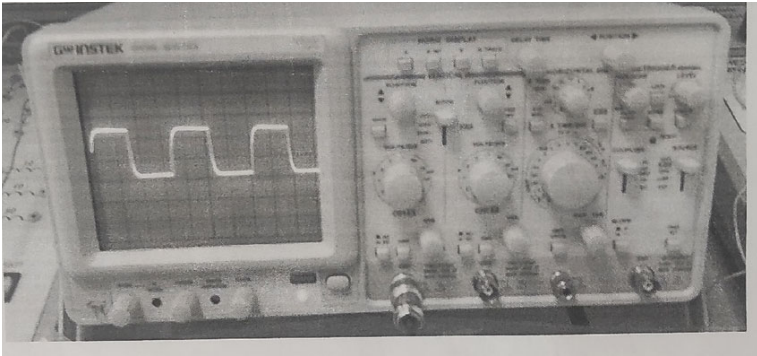


Рис. 8. Сигнал, полученный экспериментально на выходе резистора RC-цепи

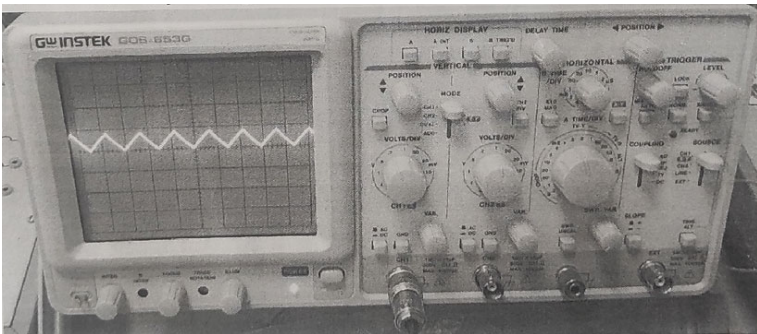


Рис. 9. Сигнал, полученный экспериментально на выходе конденсатора RC-цепи

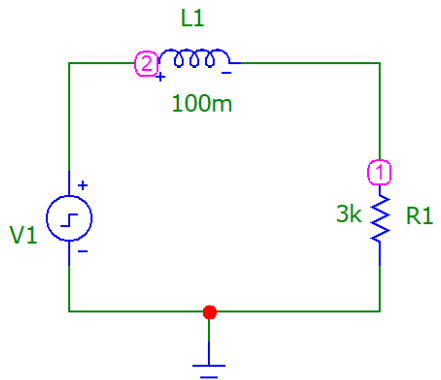


Рис. 10. RL-цепь фильтра нижних частот

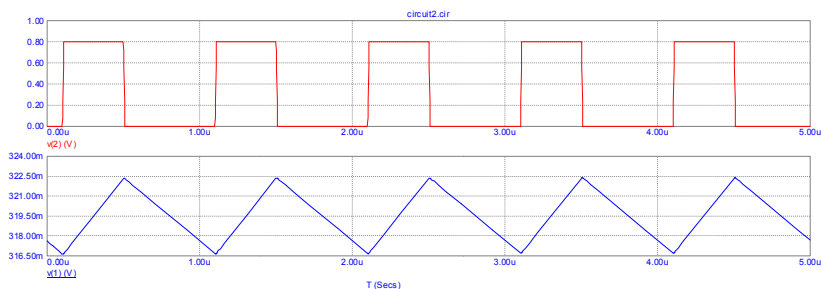


Рис. 11. Входной и выходной сигналы смоделированной RL-цепи

На рис. 12 приведена переходная характеристика, полученная экспериментально на выходе резистора RL-цепи.

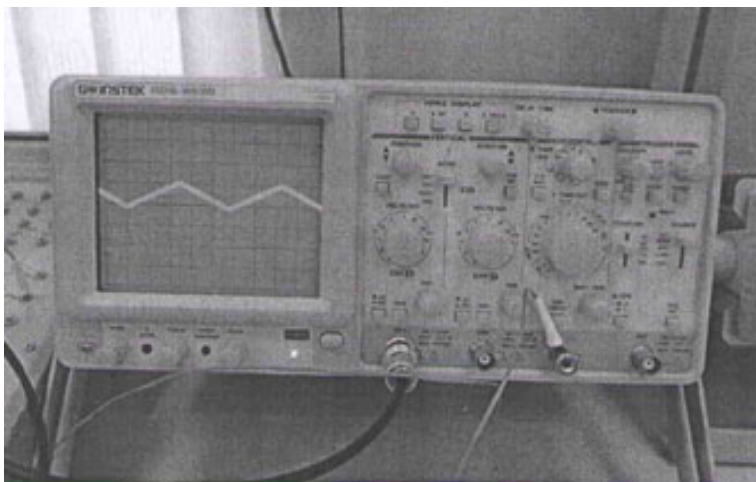


Рис. 12. Сигнал, полученный экспериментально на выходе резистора RL-цепи

Экспериментально полученные данные подтверждают результаты моделирования (рис. 11).

Выводы

В работе математически рассчитаны переходные характеристики фильтров нижних частот.

В программе Micro-Cap эти фильтры были смоделированы, и там же был проведен анализ переходных процессов.

Теоретические результаты расчетов и моделирования переходных характеристик соответствуют экспериментально полученным данным, что показывает правильность выбранной методики моделирования.

Таким образом, выбранная нами программа Micro-Cap справляется с поставленными задачами и предоставляет возможность моделирования переходных характеристик в учебном процессе по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Список использованных источников и литературы

1. *Арсеньев, Г. Н.* Основы теории цепей. Практикум : учеб. пособие / Г. Н. Арсеньев, И. И. Градов. – Москва : Форум, 2011. – 336 с.
2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей / В. П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.И. Крук. – Москва : ГЛТ, 2013. – 596 с.
3. *Кобрин, Ю. П.* Знакомство с САПР Micro-Cap v12 Evaluation : учеб. пособие / Ю. П. Кобрин. — Томск : ТУСУР, 2018. – 55 с. – URL: <https://edu.tusur.ru/publications/8507> (дата обращения: 16.10.2024).
4. Micro-Cap 7.0. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. – Spectrum Software, 1982-2001. – 712 p.

K. A. Nikiforov ^{✉ a}, student

E. G. Bulatova ^{✉ b}, CSc in phys. and math., assoc. prof.

E-mail: ^a kostyanikiforov2@gmail.com, ^b buleg61@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Comparative Analysis of the Transient Characteristics of Electrical Circuits Obtained Experimentally and Using the Micro-Cap Program

The article examines the possibilities of using the Micro-Cap application program for modeling the transient characteristics of electrical circuits in the educational process in the discipline "Theoretical Foundations of Electrical Engineering". A comparative analysis of the transient characteristics modeled in the Micro-Cap program with the transient characteristics obtained experimentally was carried out.

Keywords: comparative analysis, transient response, low-pass filter, high-pass filter.

УДК 621.396*М. А. Новиков, магистрант**Л. А. Сенаторов, аспирант**В. В. Хворенков, д-р техн. наук, проф.**Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия*

Разработка и исследование лабораторного стенда для изучения радиоэлектронного конфликта

В статье рассматривается разработка и исследование лабораторного стенда для изучения радиоэлектронного конфликта (РЭК). Лабораторный стенд позволяет моделировать и анализировать поведение радиоэлектронных систем в условиях помех и конфликтов. Основное внимание уделяется существующим моделям и программным инструментам для симуляции РЭК, таким как MATLAB/Simulink, NS-3, OMNeT++, а также эмуляторам на основе SDR. В результате проведенных исследований был создан стенд, который позволяет оценивать эффективность различных методов защиты и противодействия РЭК, проводить эксперименты и обучать специалистов. Представлены временные модели и алгоритмы работы стенда, включая формирование сигналов, оценку помех и анализ ошибок. Разработанный стенд предоставляет новые возможности для исследования и улучшения защиты радиоэлектронных систем от помех и конфликтов, что особенно актуально в условиях современных технологий.

Ключевые слова: радиоэлектронный конфликт, моделирование, лабораторный стенд, симуляция, методы защиты, радиоэлектронная борьба.

Введение

Радиоэлектронные системы играют важную роль во многих сферах человеческой деятельности. Помимо активного применения в интересах военного дела, радиоэлектроника широко используется в гражданской и промышленной сферах. В условиях современного мира растущая сложность радиоэлектронных устройств и увеличение числа пользователей приводят к ухудшению помеховой обстановки в городах. При этом пользователями радиочастотных ресурсов являются не только люди, но и «умные устройства», такие как датчики интернета вещей, которые все чаще оснащаются SIM-картами с доступом к интернету и постоянно обмениваются данными с базовыми станциями и облачными

сервисами. Это дополнительно увеличивает нагрузку на радиочастотный спектр и усложняет контроль помеховых ситуаций.

Поэтому при разработке радиоэлектронной аппаратуры важно учитывать взаимное влияние множества близко расположенных устройств, которые могут мешать работе друг друга. Столкновение (преднамеренное или непреднамеренное) интересов двух или более сторон, использующих радиоэлектронные средства, называется радиоэлектронным конфликтом (РЭК). Результатом РЭК является взаимное создание помех, что может привести к снижению качества радиосвязи, а в некоторых случаях – к полному прекращению передачи информации.

Для многих современных систем, включая системы с участием умных устройств, скорость и надежность передачи данных по радиоэлектронным каналам являются критически важными параметрами. Это обуславливает актуальность исследований и разработки методов противодействия РЭК.

Целью данной работы является разработка лабораторного стенда, который позволит моделировать и изучать РЭК, а также оценивать эффективность различных методов защиты и противодействия. Для этого были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих моделей РЭК.
2. Выполнен обзор программных реализаций моделей РЭК.
3. Разработан прототип лабораторного стенда для проведения исследований в области РЭК.

Обзор существующих моделей РЭК

Существующие модели РЭК можно условно разделить на две большие категории: аналитические и симуляционные. Аналитические модели, как правило, базируются на математических методах и теории вероятностей, в то время как симуляционные модели используют численные методы и компьютерные программы для моделирования поведения радиоэлектронных систем в условиях конфликта.

Аналитические модели. Одним из основных подходов в аналитических моделях является использование теории игр, где конфликтующие стороны рассматриваются как игроки, стремящиеся максимизировать свои выигрыши при минимизации потерь. Такие модели позволяют формализовать стратегические взаимодействия и оценивать оптимальные стратегии в условиях конфликта. Однако основным недостатком аналитических моделей является их ограниченная применимость в реальных условиях из-за упрощений и допущений, которые не всегда адекватно отражают сложные и динамичные процессы в радиоэлектронных системах [1].

Симуляционные модели. Эти модели, как правило, более детализированы и способны учитывать множество факторов, влияющих на поведение систем. Симуляционные модели могут включать в себя такие аспекты, как динамика частотного спектра, воздействие помех, характеристики передатчиков и приемников, а также поведение сторон в условиях ограниченных ресурсов. Основным недостатком симуляционных моделей является их высокая вычислительная сложность и необходимость значительных ресурсов для проведения качественных экспериментов.

Несмотря на разнообразие существующих моделей, большинство из них сталкивается с проблемой недостаточной точности и реалистичности при воспроизведении условий реального РЭК. Это связано с ограниченностью входных данных, упрощенными допущениями и невозможностью учета всех факторов, влияющих на конфликт. Таким образом, возникает необходимость в создании более точных и адаптивных моделей, которые позволят более полно исследовать РЭК и разрабатывать эффективные методы противодействия [2, 3].

Обзор существующих программ для реализаций моделей РЭК

Существуют различные программные инструменты, предназначенные для моделирования и анализа РЭК. Рассмотрим наиболее популярные из них:

1. MATLAB/Simulink. Это мощный инструмент для моделирования и симуляции динамических систем, широко используемый в научных исследованиях и промышленности. MATLAB/Simulink позволяет создавать сложные модели радиоэлектронных систем, включающие в себя различные аспекты РЭК. Однако для эффективного использования этого инструмента требуется высокая квалификация пользователя и значительные затраты времени на разработку моделей [4].

2. NS-3 (Network Simulator 3). Это симулятор сетей, используемый для исследования характеристик и поведения различных сетевых протоколов и систем. NS-3 может быть адаптирован для моделирования РЭК, включая помехи и взаимодействия между различными системами. Основным преимуществом NS-3 является его открытый код и возможность настройки под конкретные задачи. Однако недостатком является ограниченность встроенных моделей РЭК, что требует дополнительных усилий по их разработке [5].

3. OMNeT++. Это модульный симулятор, предназначенный для моделирования и анализа коммуникационных сетей. OMNeT++ предоставляет гибкие возможности для создания и исследования моделей РЭК, а также интеграции с другими инструментами и библиотеками. Преимуществом OMNeT++ является его гибкость и возможность расшире-

ния функциональности, однако сложность настройки и необходимость разработки пользовательских модулей могут затруднять его использование [6].

4. Эмуляторы на основе SDR (Software-Defined Radio). Эти инструменты позволяют проводить исследования РЭК в реальных условиях, используя программно-определяемые радиостанции. Такие эмуляторы позволяют более точно моделировать физические процессы и оценивать эффективность различных методов защиты и противодействия. Основным недостатком является высокая стоимость оборудования и необходимость значительных ресурсов для организации и проведения экспериментов [7].

Matlab был выбран в качестве основного инструмента для моделирования по ряду причин:

1) Matlab по сравнению с другими программами является более универсальным и поддерживает интеграцию с различными инструментами, что облегчает разработку моделей, включающих физическое моделирование, управление сигналами и оптимизацию.

2) Matlab обладает большим набором библиотек и инструментов для анализа и визуализации, что делает его удобным для проведения многогранных исследований, связанных с помехами и радиоэлектронной борьбой.

3) Кроме того, Matlab широко используется в научных и промышленных исследованиях, что подтверждает его надежность и гибкость.

Таким образом, выбор Matlab основан на его функциональности, гибкости и возможности интеграции различных аспектов моделирования, что позволяет добиться более глубокого анализа РЭК и оценки методов противодействия.

Примеры применения лабораторного стенда

Лабораторный стенд может быть использован для решения широкого круга задач в области радиоэлектронных систем и противодействия РЭК:

1) Исследование устойчивости систем связи. Оценка влияния различных видов помех на качество передачи данных, разработка и тестирование методов повышения устойчивости и надежности систем связи.

2) Разработка методов РЭБ. Моделирование и тестирование различных методов радиоэлектронной борьбы, оценка их эффективности и влияние на системы противника.

3) Обучение и подготовка специалистов. Лабораторный стенд может использоваться в образовательных целях для подготовки специалистов

в области радиоэлектронных систем, предоставляя им возможность проведения реальных экспериментов и исследования поведения систем в условиях РЭК.

4) Анализ и прогнозирование РЭК. Исследование динамики РЭК, моделирование возможных сценариев и разработка стратегий предотвращения и минимизации их последствий.

Разработка лабораторного стенда для исследования РЭК

На основе анализа существующих моделей и программных реализаций было принято решение разработать лабораторный стенд, который в своей основе будет иметь временную модель РЭК.

Входные данные, необходимые для работы стенда:

- 1) Тип модуляции (ЛЧМ, QAM-n, BPSK).
- 2) Параметры сигнала.
- 3) ОСШ в канале связи.
- 4) «Сила» подавления средствами РЭБ (–5/–10 к ОСШ в канале связи).
- 5) Размер передаваемых данных, бит.
- 6) Служебные данные, %.
- 7) Скорость передачи данных, бит/с.
- 8) Размер передаваемых данных квитанции, бит.
- 9) Служебные данные квитанции, %.
- 10) Скорость передачи данных квитанции, бит/с.
- 11) Диапазон значений отдельных интервалов (минимальный, максимальный, средний, случайный – скорость реакции участников конфликта).

Выходные данные (результат работы стенда):

- 1) График передачи сигнала и получения квитанции без воздействия РЭБ (эталон).
- 2) График передачи сигнала и получения квитанции с учетом воздействия РЭБ.
- 3) BER – коэффициент ошибок.

Алгоритм работы стенда:

- 1) Определяется время на передачу пакета данных и квитанции:

$$t = \frac{R+R*d}{v}, \text{с} \quad (1)$$

где R – размер сообщения, бит; d – размер служебных данных, %; v – скорость передачи данных, бит/с.

Примечание: скорость радиоволн принимается равной скорости света. Расстояние передачи считаем незначительным для влияния на качество связи, поэтому его учитываем лишь формально.

- 2) Генерируется передаваемое сообщение (набор из R случайных нулей и единиц).
- 3) Создается модулированный сигнал.
- 4) Создается модулированный сигнал с шумом, но без воздействия РЭБ.
- 5) Формируется сигнал после воздействия РЭБ (рис. 1). РЭБ засекает сигнал (вероятность обнаружения – 100 %), принимает решение и накладывает временную помеху. Цикл продолжается с начала, пока передача не завершится, то есть когда РЭБ не фиксируют передачу.
- 6) Демодулируем полученный сигнал, считаем ошибки.

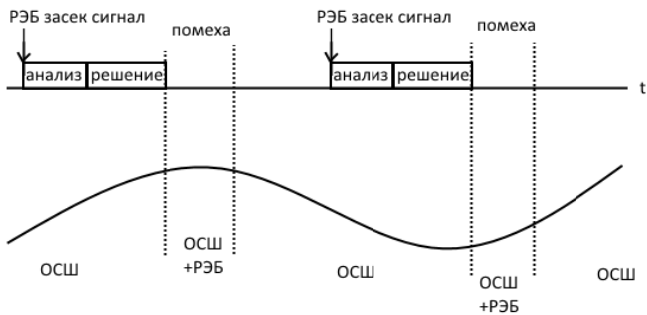


Рис. 1. Формирование сигнала под воздействием РЭБ

В результате анализа требований была составлена модель в матлаб, структурная схема которой приведена на рис. 2. Разработанная модель является экспериментальной, в будущем планируется ее доработка и создание на ее основе приложения для ПК.

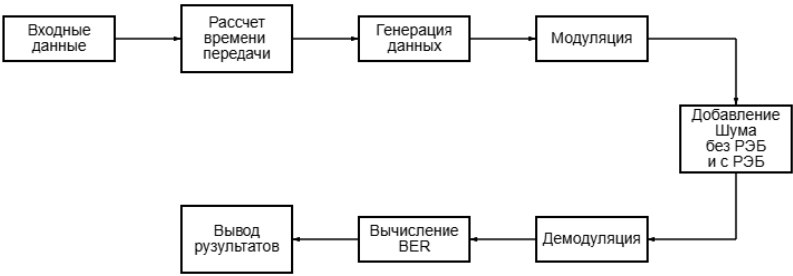


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной модели для изучения РЭБ

Описание временной модели РЭК

На рис. 3 представлены следующие обозначения:

- t_{pBP} , t_{pBO} , t_{pPO} – время распространения сигнала;
- $t_{пак}$, $t_{кв}$ – время передачи пакета/квитанции;
- $t_{фк}$ – время формирования квитанции;
- $t_{ан}$ – время анализа принятого сигнала станцией РЭП;
- $t_{пр}$ – время принятия решения на выбор режима подавления;
- $t_{фс}$ – время формирования сигнала станцией РЭП;
- $t_{вклУМ}$ – время переключения режима функционирования усилителя мощности (в том числе включения);
- $t_{рЭП}$ – интервал воздействия сформированной помехи.

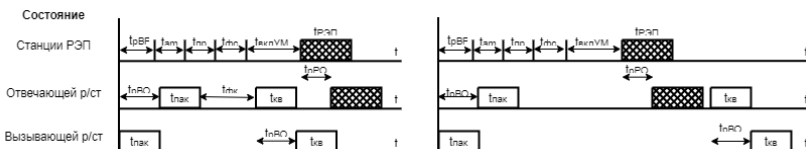


Рис. 3. Временная модель РЭК

Из всех временных периодов на рисунке разработчик может повлиять только на время передачи пакета, время передачи и квитанции и время формирования квитанции. Рассмотрим два возможных решения проблемы противодействия средствам РЭП [8]:

1) Передача и прием квитанции до наведения помехи (на рисунке слева).

2) Передача пакета до помехи, получение квитанции с задержкой после помехи/по другой частоте (на рисунке справа).

При этом временная модель РЭК сведется к следующему виду:

- 1) $t_{pBO} + t_{пак} + t_{фк} + t_{кв} < t_{pBP} + t_{ан} + t_{пр} + t_{фс} + t_{вклУМ} + t_{pPO}$;
- 2) $t_{pBO} + t_{пак} < t_{pBP} + t_{ан} + t_{пр} + t_{фс} + t_{вклУМ} + t_{pPO}$.

Таблица 1. Граничные значения каждого временного отрезка для передачи в КВ-диапазоне

Интервал	$t_{min}, \text{мс}$	$t_{max}, \text{мс}$
$t_{рЭП}$	48,2	342
t_{pBP}	1,6	16
$t_{ан}$	10	100
$t_{пр}$	0	10

Окончание табл. 1

Интервал	$t_{\min}, \text{мс}$	$t_{\max}, \text{мс}$
$t_{\text{фс}}$	0	100
$t_{\text{ррО}}$	1,6	16
$t_{\text{рвО}}$	1	10
$t_{\text{фк}}$	0	1
$t_{\text{вклУМ}}$	35	100
$t_{\text{кв}}$	10	100
$t_{\text{пак}}$	10	200
$t_{\text{кв}}$	10	100

Оценим предельные значения длительности пакета и квитанции для минимальных, средних и максимальных значений задержек. В результате подстановок получим следующие соотношения:

Таблица 2. Предельные значения длительности пакета и квитанции

Случай	Мин. значения, мс	Ср. значения, мс	Макс. значения, мс
1	$t_{\text{пак}} + t_{\text{кв}} < 47,2$	$t_{\text{пак}} + t_{\text{кв}} < 189,1$	$t_{\text{пак}} + t_{\text{кв}} < 331$
2	$t_{\text{пак}} < 47,2$	$t_{\text{пак}} < 189,6$	$t_{\text{пак}} < 332$

Значения для обоих случаев похожи, при этом случай 2 кажется более перспективным, так как необходимо учитывать только длительность передачи пакета. Время передачи может составлять от 10 до 200 мс, то есть при минимальных, средних и максимальных значениях задержки возможна передача информации до наведения помехи [9, 10].

Исследование лабораторной модели

Краткое описание ключевых шагов:

- 1) Модуляция BPSK: бинарное сообщение преобразуется в значения -1 и $+1$, что соответствует модуляции BPSK.
- 2) Добавление шума: создаются два сигнала – один с добавленным шумом без воздействия РЭБ (noisySignal), второй – с воздействием РЭБ (rebSignal).
- 3) Вычисление BER (коэффициент ошибок): путём сравнения полученного сигнала после демодуляции с оригинальными бинарными данными рассчитывается коэффициент ошибок (BER) для обоих случаев.
- 4) Построение графиков: построены графики для оригинального сигнала, сигнала с шумом (без РЭБ) и сигнала с шумом и воздействием РЭБ.

Таблица 3. Результаты выполнения

Время передачи пакета данных, с	Время передачи пакета квитанции, с	BER без РЭБ	BER с РЭБ
1,1	0,11	0,032	0,283

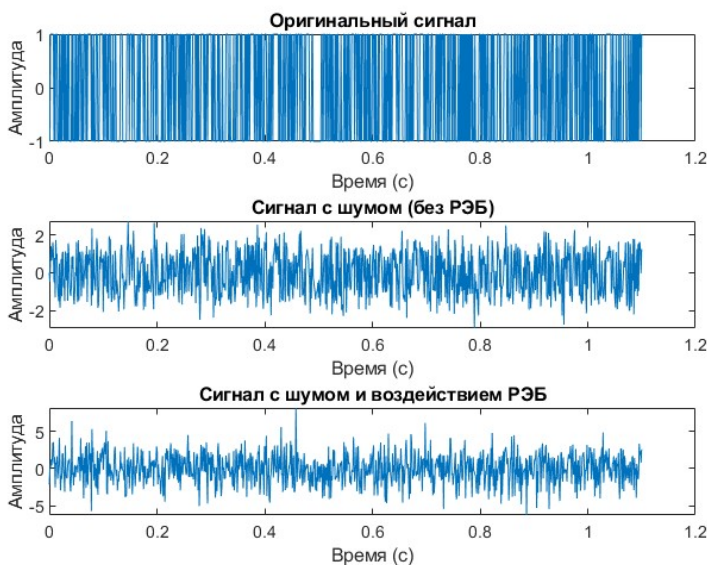


Рис. 3. Результаты исследования лабораторного стенда в программе Matlab

Заключение

В ходе исследования была разработана и протестирована временная модель РЭК, интегрированная в лабораторный стенд. Этот стенд позволяет проводить детальные эксперименты по оценке влияния помех на системы связи, тестировать методы радиоэлектронной борьбы и обучать специалистов. Результаты работы подтверждают эффективность предложенных методов и демонстрируют возможности лабораторного стенда как инструмента для дальнейших исследований и разработки стратегий защиты в условиях РЭК. Научные выводы включают подтверждение необходимости интеграции как аналитических, так и симуляционных моделей для более точного воспроизведения реальных условий и повышения надежности радиоэлектронных систем.

Список использованных источников и литературы

1. *Борисов, В. И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев ; под ред. В. И. Борисова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : РадиоСофт, 2008. – 512 с.
2. *Гремяченский, С. С.* Введение в теоретико-игровой анализ радиоэлектронного конфликта систем радиосвязи со едствами радиоподавления и некоторые оценки результатов конфликта / С. С. Гремяченский, В. И. Николаев. – Воронеж : Воронежский НИИ связи, 1995. – 48 с
3. *Вентцель, Е. С.* Исследование операций. – Москва : Сов. радио, 1972. – 552 с.
4. MATLAB Documentation. Simulink User's Guide. MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
5. NS-3 Documentation. User Guide and Tutorial. NS-3 Consortium. – URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/>
6. OMNeT++ User Guide. Simulation Manual. OMNeT++ Community. – URL: <https://omnetpp.org/documentation/>
7. GNU Radio Documentation. User and Developer Guide. GNU Radio Foundation. – URL: <https://www.gnuradio.org/doc/>
8. Патент на полезную модель, Российская Федерация. № 160175. Научно-исследовательская модель оценки эффективности сил и средств РЭБ / Грибков Р. А., Зайцев А. Г., Неплюев О. Н., Шевчук В. И., Ягольников С. В., 2015
9. *Путилин, А. Н.* Модель взаимодействия линии радиосвязи и станции радиоэлектронного подавления // Региональная информатика – 2012. 24–26 окт. 2012 г. : материалы конф. – Санкт-Петербург : СПОИСУ, 2012.
10. *Путилин, А. Н.* Модель функционирования сети радиосвязи в условиях радиоэлектронного подавления / А. Н. Путилин, С. В. Труфанов // Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения : материалы Всерос. науч. конф. Т. IV : Телекоммуникации и связь в информационно-управляющих системах специального назначения / под ред. Ю. В. Бородакия. – Москва : Концерн «Системпром», 2013. – С. 42–44.

M. A. Novikov, master student

L. A. Senatorov, postgraduate

V. V. Khvorenkov, DSc in engineering, prof.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development and Research of a Laboratory Stand for the Study of Electronic Warfare

This paper discusses the development and research of a laboratory stand for studying electronic warfare (EW). The laboratory stand enables the modeling and analysis of electronic systems' behavior under interference and conflict conditions. The focus is on existing models and software tools for EW simulation, such as MATLAB/Simulink, NS-3, OMNeT++, and SDR-based emulators. Through the conducted research, a stand was created that allows for assessing the effectiveness of various protection and countermeasure methods, conducting experiments, and training specialists. Temporal models and operational algorithms of the stand, including signal formation, interference evaluation, and error analysis, are presented. The developed stand offers new opportunities for researching and improving the protection of electronic systems from interference and conflicts, which is particularly relevant in modern technology conditions.

Keywords: electronic warfare, modeling, laboratory stand, simulation, protection methods, electronic countermeasures.

УДК 623.77

Г. С. Пестерев^{✉ a}, студент
Е. М. Зайцева^{✉ b}, канд. пед. наук, доц.
Р. А. Хатбуллин, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ^a grishap2018@mail.ru, ^b em_zaytseva@yahoo.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработка и создание устройства лазерной защиты от БПЛА

В статье рассмотрены способы борьбы с БПЛА, приведена идея устройства для защиты от БПЛА, предложен новый способ борьбы с ними. Приведено теоретическое обоснование реализуемости идеи и расчеты, обосновывающие возможность его реализации, а также описан опыт, подтверждающий практическую ценность и реализуемость предложенной идеи.

Ключевые слова: БПЛА, лазерный луч, оптическая система, преломление лазерного луча, засвечивание матрицы.

Введение

Целью проекта является теоретическое и практическое обоснование идеи защиты от беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при помощи засвечивания матрицы камеры наблюдения, расположенной на БПЛА.

В настоящее время для борьбы с БПЛА используются различные методы, например, радиоэлектронная борьба (РЭБ). Как известно, БПЛА осуществляют связь с пультом управления по радиоканалу. Системы РЭБ могут создавать помехи на используемых противником радиочастотах, что приводит к потере связи и управления [1–3]. Но некоторые типы дронов нечувствительны к таким видам борьбы, например, тип дронов «Баба-яга». Зачастую дроны такого типа управляются через терминал спутникового интернета Starlink, установленный прямо на коптере сверху. Это делает такие аппараты нечувствительными к средствам РЭБ.

Но даже если дрон управляется по радиоканалу, вывести его из строя – очень трудная задача. Так, если дрон имеет усилитель сигнала, управляется через мощную антенну, или частота защиты нестандартная, то подавить его с помощью средств РЭБ будет очень сложно.

В настоящее время противостояние средств РЭБ и БПЛА, в том числе FPV-дронов (First-Person View), выходит на новый уровень.

Разработка и производство FPV-дронов с управлением и питанием по оптоволокну и/или по проводам позволит исключить фактор РЭБ в принципе.

Открытые источники информируют о проведении на Украине испытаний перспективного немецкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) HSCX от компании HIGHSAT с управлением по оптоволоконному кабелю. Такой БПЛА абсолютно не подвержен воздействию средств РЭБ, кроме того, его невозможно засечь детектором БПЛА из-за отсутствия радиосигналов управления и передачи видеосигнала.

Дальность полёта БПЛА HSCX достигает двадцати километров, оптоволокну достаточно прочное – дрон может летать над пересечённой местностью, водными преградами, деревьями, строениями.

Российским разработчикам необходимо предпринимать ответные встречные меры, для того чтобы не допустить получения противником одностороннего превосходства на поле боя в части FPV-дронов, а также в плане БПЛА других типов.

Предлагаем защищать объекты от БПЛА засвечиванием их видеокамер разложенным в растр лазерным лучом, наводимым на камеру летательного аппарата с определенной частотой и мощностью, достаточной для ослепления «засветки» электронной начинки камеры.

В настоящее время созданы мощные лазерные установки, предназначенные для ослепления камер и выжигания матриц БПЛА в боевых условиях, но это сложные и массивные установки, оснащенные различными системами наведения (акустическими, оптическими, радиоволновыми) [4, 5]. Малая распространенность подобных установок обусловлена необходимостью применения сложных систем наведения луча точно на оптику беспилотника и удержания его на цели определенное время, и такие комплексы требуют достаточно много энергии для своего функционирования.

Мы предлагаем систему, не нуждающуюся в наведении на цель. Идея заключается в создании защитного купола, созданного вращающимся лазерным лучом, разложенным в плоскость с помощью оптической системы [3].

Вращающаяся лазерная плоскость, попав на оптику беспилотника, создаст кратковременные вспышки «засветы» на изображении, которое передается оператору. Электронные модули камеры после «засвета» восстанавливают свою работу с небольшой задержкой. Если через определенный промежуток времени вновь «засветить» матрицу камеры, то камера передаст оператору вместо требуемой информации лишь «засветы».

Таким образом, несколько устройств, установленных по периметру с частичным перекрытием зон действия, создадут достаточный барьер для БПЛА. Любые видеокамеры, устанавливаемые на БПЛА, имеют CMOS-матрицу, реагирующую на освещенность, и «засветка» матрицы лазерным лучом приведет как минимум к ослеплению камеры, а при больших мощностях лазерных модулей такое устройство может привести даже к выгоранию пикселей матрицы. В любом случае такое устройство сможет создать существенные помехи БПЛА. Устройства, по причине их простой конструкции, возможно изготовить мобильными и автономными. Свечение лазера будет привлекать внимание противника, поэтому возможно создание ложных целей. Питание устройства будет производиться от энергии техники, на которой оно будет располагаться, или от своего источника питания.

Мощность лазерного луча при разложении в плоскость снижается, и, если ее будет недостаточно, возможно применение в установке нескольких лазеров со своими вращающимися оптическими системами, засвечивающими определённый сектор сферы.

Установка данного изобретения возможна на окоп или блиндаж. Для управления данным устройством не требуется особой подготовки, необходимо пройти короткие курсы, чтобы научиться пользоваться данным оборудованием.

Предлагается разработать устройство для борьбы с БПЛА, имеющее лазерную установку и оптическую систему, которая будет разлагать луч лазера в растр, создавая тем самым световую завесу определенной площадью. Если такая завеса попадет на камеру БПЛА, то она создаст эффект «засвета» на матрице камеры, что дезориентирует оператора БПЛА.

Для удерживания луча на БПЛА необходимо добавить к системе лазерный, ультразвуковой или радиорадар, который будет определять местоположение БПЛА и направлять луч на него. Система должна быть смонтирована на вращающейся платформе для большей площади воздействия.

Необходимо помнить, что такое устройство в активном режиме будет быстро обнаружено и уничтожено артиллерией либо другим способом, поэтому включаться оно должно при непосредственной угрозе атаки БПЛА. Так как стоимость такой установки значительно меньше стоимости снарядов, то можно использовать её в качестве источника формирования ложных целей.

Устройство должно:

- создать «засвет» матрицы камеры БПЛА;
- удерживать БПЛА в световой завесе;

- не должно обнаруживать свое местонахождение;
- быть недорогим и легко эксплуатируемым.

Разработка

Спроектированные схемы устройств представлены на рисунках. На рис. 1 приведена схема устройства с вращающимся лазером. К неподвижной платформе 6 крепится электродвигатель 4, его вал 8 вращает шкиф 3, шкиф 3 вращает шкиф 5, на котором установлен лазер 2, оптическая система 1 над лазером 2 разлагает луч в плоскость, питание электродвигателя происходит по кабелю 10, питание лазера происходит по кабелю 9, шкиф 5 удерживает ось 7.

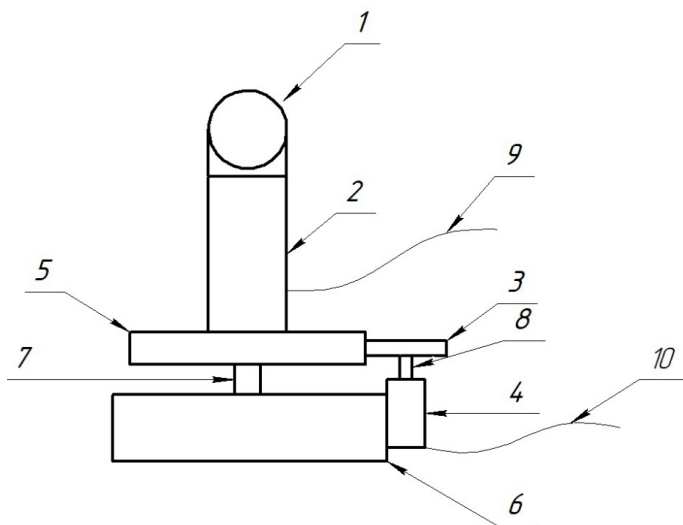


Рис. 1. Схема устройства с вращающимся лазером: 1 – оптическая система; 2 – лазер; 3 – шкиф электромотора; 4 – электродвигатель; 5 – шкиф вращающейся платформы; 6 – неподвижная платформа; 7 – ось; 8 – вал; 9, 10 – кабель

На рис. 2 приведена схема устройства с неподвижным лазером и вращающейся над ней оптической системой. К неподвижной платформе 7 крепится кожух 8, внутри которого установлен лазер 9, на неподвижный блок 6 крепится электродвигатель 5, его вал 4 вращает шкиф 3, от чего вращается шкиф 2 с установленной на нем оптической системой 1, питание лазера осуществляется по проводу 10, питание электродвигателя осуществляется по проводу 11, луч лазера проходит через отверстие 12 в шкифе 2, шкиф 2 удерживает кожух 8.

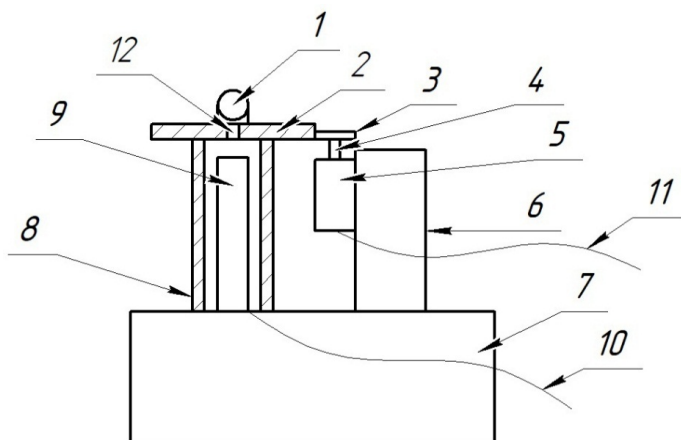


Рис. 2. Схема устройства с вращающейся оптической системой и неподвижным лазером: 1 – оптическая система; 2 – шкиф; 3 – шкиф электромотора; 4 – вал; 5 – электромотор; 6 – неподвижный блок; 7 – неподвижная платформа; 8 – кожух; 9 – лазер; 10, 11 – кабель; 12 – отверстие

Произведем расчет при мощности лазера SDLaser 303 – 1000 МВт, 532 нм, с зеленым лучом.

Пусть БПЛА находится на расстоянии 100 метров. Ширина световой завесы $D = 1$ м.

Тогда площадь «засвета» составит:

$$S = \pi R^2 = 0,785 \text{ м}^2.$$

Мощность на 1 см^2 на расстоянии 100 м будет составлять:

$$P = 12,7 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}.$$

Такой мощности достаточно для дезориентирования оператора, так как необходимая мощность для «засвета» матрицы камер, устанавливаемых на БПЛА, от 5 мВт на см^2 и более. Усиление мощности лазера обеспечит увеличение эффективного радиуса действия данной системы.

Выводы

Предложенное в данной статье устройство лазерной защиты от БПЛА обеспечит безопасность не только военных, но и гражданских объектов. Необходимо детальное изучение вопроса, проведение экспериментов, создание прототипа и проведение испытаний. Данная работа

будет продолжена на кафедре «Радиотехника» Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова студентами, обучающимися по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Список использованных источников и литературы

1. *Аветисян, В. Г.* Распространение радиоволн / В. Г. Аветисян, Е. Г. Никогосян. – Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 208 с.
2. Основы теории радиоэлектронной борьбы / под редакцией Н. Ф. Николенко. – Москва : Воениздат, 1987. – 351 с.
3. *Перунов, Ю. М.* Методы и средства радиоэлектронной борьбы : монография / Ю. М. Перунов, А. И. Куприянов. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 376 с.
4. *Вейко, В. П.* Введение в лазерные технологии / В. П. Вейко, А. А. Петров, А. А. Самохвалов ; под ред. В. П. Вейко. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2018. – 161 с.
5. Системы ориентации и наведения беспилотных летательных аппаратов : учеб. пособие / В. В. Лентовский, Т. Н. Князева, А. В. Герт, Л. И. Васильева. – Санкт-Петербург : БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, 2019. – 86 с.

G. S. Pesterev^a, student

E. M. Zaytseva^b, CSc in pedagogics, assoc. prof.

R. A. Khatbullin, CSc in engineering, assoc. prof.

E-mail: ^a grishap2018@mail.ru, ^b em_zaytseva@yahoo.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development and Creation of a Laser Protection Device Against UAVs

This article discusses methods of combating UAVs, introduces the idea of a device for protection against UAVs, and proposes a new method of combating them. Theoretical justification for the feasibility of the idea and calculations substantiating the possibility of their implementation are provided, as well as the described experience confirming the practical significance and feasibility of the proposed idea.

Keywords: UAV, laser beam, optical system, laser beam refraction, illumination matrices.

УДК 001.891.57

Д. И. Плешаков, студент

И. А. Арсланов[✉], студент

Е. Г. Булатова, канд. физ.-мат. наук, доц.

В. А. Сидорина, канд. пед. наук, доц.

E-mail: arslanovildar0@gmail.com

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Измерение помехоустойчивости ЛЧМ-сигналов при скачкообразной и перекрёстной манипуляции

В статье рассмотрены результаты эксперимента на основе стохастической модели приемопередачи цифровых сигналов с ЛЧМ-манипуляцией. Для проведения экспериментов была выбрана пакетная среда MATLAB 2013. Был проведен сравнительный анализ двух видов манипуляций на основе зависимостей помехоустойчивости к узкополосной помехе при разных соотношениях их мощностей.

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, узкополосная помеха, MATLAB, помехоустойчивость, виды манипуляции.

Введение

Потребность в постоянном росте объема передаваемой информации с высоким уровнем достоверности приводит к необходимости увеличения количества используемых систем связи и управления. Однако такой подход создает проблемы в обеспечении электромагнитной совместимости, помехозащищенности и помехоустойчивости систем связи. Решению этих проблем способствует использование в качестве носителей информации широкополосных сигналов (ШПС), а также применение оптимальных пространственно-временных алгоритмов принимаемых сигналов [1, 2].

Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) является частным случаем таких сигналов. Известно, что при аддитивной узкополосной помехе (УПП) она слабо влияет на вероятность ошибки в системах с ШПС, а значит, и на помехоустойчивость. Это может быть использовано для цифровой передачи информации. Кроме того, на помехозащищенность влияет выбор способа манипуляции при передаче [3–5].

Целью нашей работы является выявление минимального соотношения полос помехи и полезного сигнала для обеспечения оптимальной помехозащищенности, при этом будет проведено сравнение двух видов манипуляции, занимающих одинаковую полосу частот. Для решения поставленной цели воспользуемся моделированием в среде MATLAB.

Описание эксперимента

Для вычисления помехозащищенности дадим определение. Помехозащищенность – способность системы при работе в условиях помех работать с заданной точностью. Для оценки ее уровня необходимо найти энергетическое соотношение полезного сигнала и помехи, при котором сохраняется минимальная достоверность работы системы. Для вычисления помехозащищенности была зафиксирована вероятность ошибки на 1 и 5 %.

Для проведения эксперимента была написана соответствующая программа в среде MATLAB. При рассмотрении были выбраны два вида манипуляции ЛЧМ-импульсов для создания цифровой связи:

1. Перекрестный.
2. Скачкообразный.

Перекрестный вид манипуляции – сигнал единицы и нуля отличаются знаком изменения частоты. Частота либо увеличивается, либо уменьшается.

Скачкообразный вид манипуляции – эталонный импульс может быть разорван в двух различных местах во временной оси и относительно места разрыва циклически сдвигается.

Частотно-временные характеристики таких информационных импульсов будут представлены ниже на рис. 1.

Оба вида манипуляции должны обеспечивать одну и ту же полосу сигнала от f_0 до f_K . для экономии частотного ресурса.

Для перекрестного вида манипуляции отчеты сигнала ЛЧМ-радиоимпульса были получены согласно формулам:

$$S_1(t) = \sin \left[2\pi \cdot \left(f_0 \cdot t + m \cdot \frac{t^2}{2} \right) \right], \quad (1)$$

$$S_0(t) = \sin \left[2\pi \cdot \left(f_K \cdot t - m \cdot \frac{t^2}{2} \right) \right], \quad (2)$$

где $S_0(t)$ и $S_1(t)$ – сигналы, соответствующие передаче информационных 1 и 0 соответственно; $f_K - f_0 = \Delta F$ – границы спектра сигнала; t – время; m – скорость изменения частоты, которая может быть вычислена по формуле

$$m = \frac{\Delta F}{\Delta t} = \frac{f_K - f_0}{t_K - t_0}, \quad (3)$$

где $t_k - t_0 = \Delta t$ – начало и конец окна анализа сигнала, соответствующие времени передачи одного импульса.

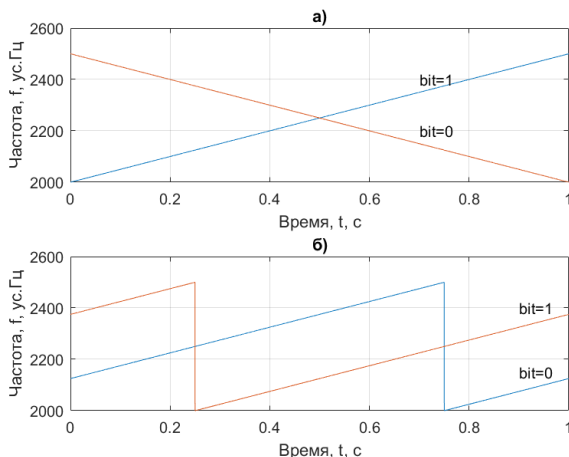


Рис. 1. Частотно-временные характеристики ЛЧМ-импульсов при перекрёстной манипуляции (а) и скачкообразной манипуляции (б)

На рис. 1 ось ординат измеряется в условных герцах, под которыми понимается количество периодов на длительность сигнала. Так как длительность и начальные частоты в реальных системах могут быть любыми, то значения на данных осях на рис. 1 и 2 стоит относить к частному случаю. А измерения этого эксперимента считать универсальными для любых значений частот и длительностей, выполняющих условие: 10 000 отсчетов на длительность одного переданного бита в тех случаях, когда канал системы передачи данных не учитывает особенности распространения самого сигнала.

В среде MATLAB формулы (1) и (2) были заданы следующим образом (dT – период дискретизации, T – вектор времени):

```
dT=1e-4;
T=t0:dT:t1-dT;
m=(f1-f0)/(t1-t0); %(1.3)
CN1=sin(2*pi*(f0*T+m*T.^2)); %(1.1)
CN0=sin(2*pi*(f1*T-m*T.^2)); %(1.2)
```

Для скачкообразного вида манипуляции за эталон был взят импульс с нарастанием частоты, сформированный согласно формуле (1). Далее

шкала времени была разделена на 4 части. Для создания информационных импульсов эти части были переставлены таким образом:

- 2, 3, 4, 1 – для импульса нуля;
- 4, 1, 2, 3 – для импульса единицы.

Здесь числа обозначают номер части эталонного импульса до перестановки.

Частотно-временные характеристики представлены на рис. 1, б.

Так как вектор времени при модуляции имеет известную длину, равную 10 000 отчётов, то можно не вычислять границы, а задать вручную. Таким образом, части эталонного импульса будут иметь следующие границы во временных отчётах:

- 1) 1÷2 500;
- 2) 2 501÷5 000;
- 3) 5 001÷7 500;
- 4) 7 501÷10 000.

Код для создания импульсов будет выглядеть следующим образом:

```
Sk0=[CH1(1,2500:1e4) CH1(1,1:2500)];
Sk1=[CH1(1,7500:1e4) CH1(1,1:7500)].
```

Оба вида манипуляции при одинаковых начальных и конечных частотах будут иметь одинаковую ширину спектра, что является важным преимуществом для экономии частотных ресурсов. На рис. 2 представлены результаты быстрого преобразования Фурье, выполненного с помощью готовой функции среды MATLAB:

```
FCH1=fft(CH1);
FL1=fft(Sk0).
```

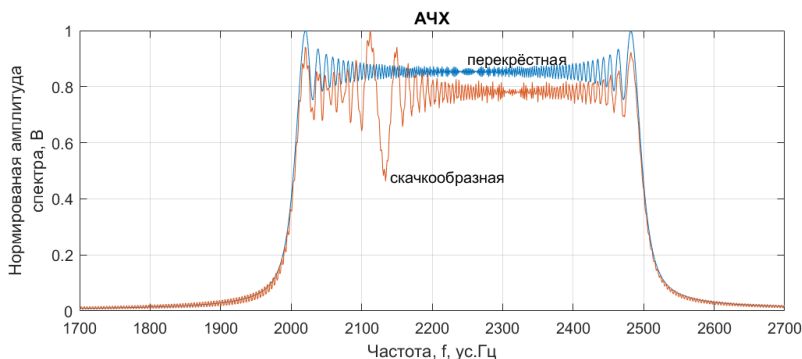


Рис. 2. Спектры информационных ЛЧМ-импульсов для перекрёстной и скачкообразной манипуляции

На рис. 2 спектры обоих импульсов занимают почти одинаковую полосу, но при этом имеют разную форму.

Согласно теории для оценки помехозащищенности для ошибки различения можно использовать коэффициент взаимной корреляции между информационными импульсами. Для двух видов манипуляции эти коэффициенты будут составлять:

- 0,0224 – для перекрестной манипуляции;
- $6,7847 \cdot 10^{-5}$ – для скачкообразной манипуляции.

Таким образом, метод скачкообразной манипуляции будет более помехоустойчивым к ошибкам различения в цифровой связи. Однако сколько будет составлять этот выигрыш, не ясно. Поэтому создадим стохастическую модель приемопередачи внутри среды MATLAB.

Результаты моделирования

Были проведены 10 000 экспериментов при заданных параметрах отношения полосы узкополосной помехи и информационного сигнала. По результатам всех экспериментов была рассчитана вероятность ошибки различения. Постепенно увеличивая соотношение амплитуд сигнала и шума, было найдено такое соотношение, которое обеспечило достаточную помехозащищенность. После проведения экспериментов был построен график зависимости помехозащищенности от соотношения ширины полос (рис. 3).

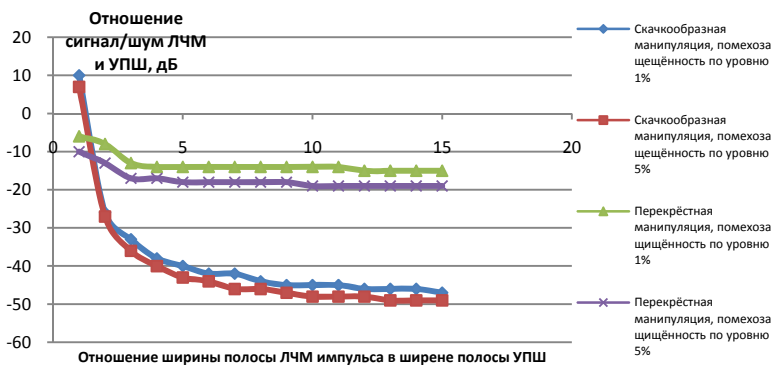


Рис. 3. Помехозащищенность для задачи различения сигналов ЛЧМ при зашумлении узкополосной помехой

Из графика видно, что оба вида манипуляции имеют ограниченную эффективность, так как помехозащищенность практически перестает

расти после достижения определенного отношения полос. Однако скачкообразно манипулированная передача имеет более выраженную гиперболизированную зависимость. Тогда как перекрестно манипулированную передачу можно считать квазипостоянной при увеличении соотношения полос выше 3.

Стоит отметить, что узкополосная помеха, являющаяся частотно-манипулированным случайным сигналом, была создана по следующей формуле:

$$U_{\text{упш}} = \cos\left(2\pi \cdot \left(f_0 + \frac{\Delta F}{2}\right) + \sum_{k=1}^N M \cdot \frac{U_k}{F_k} \cdot \sin(2\pi \cdot F_k + \varphi_k)\right), \quad (4)$$

где f_0 – начальная частота и ΔF – полоса ЛЧМ-импульса; M – глубина модуляции, равная 10; F_k – заранее заданные гармоники, максимальное число из которых ($k = N$) определяет полосу УПШ; U_k и φ_k – случайные амплитуды и фазы гармоник.

Вывод

Таким образом, при применении скачкообразной манипуляции можно получить существенный выигрыш помехозащищенности перед перекрестной, и она будет расти при увеличении полосы. Однако этот выигрыш не будет бесконечно расти. Для экономии ресурсов полосы или вычислительных мощностей достаточно соотношение ширины полос ЛЧМ-сигнала больше в 5–9 раз, чем ширина помехи, так как дальнейшее увеличение полосы не приведет к существенной эффективности увеличения помехозащищенности.

Список использованных источников и литературы

1. *Сенаторов, Л. А.* Оценка влияния скорости изменения частоты сигнала с линейной частотной модуляцией на энергетическую скрытность и помехоустойчивость / Л. А. Сенаторов, В. В. Хворенков, Е. М. Зайцева // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 85–93. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-2-85-93. – EDN GRVEFS.
2. *Арсланов, И. А.* Возможность и перспективы использования сигналов с линейно-частотной модуляцией / И. А. Арсланов, Д. И. Плешаков, Ю. Н. Черенков // Вектор развития. – 2024. – № 13. – С. 4–8. – EDN EIFRMD.
3. *Фролов, А. А.* Влияние узкополосных и широкополосных помех на многочастотную импульсную СШП-систему радиодоступа // Электросвязь. – 2014. – № 7. – С. 32–35. – EDN SKFTYD.
4. *Черноусов, А. В.* Анализ воздействия аддитивных помех на широкополосный сигнал // Решетневские чтения. – Красноярск : Сибир. гос. аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева», 2016. – С. 306–308. – EDN XEAFAR.

5. Дворников, С. С. Помехоустойчивость бинарных ЛЧМ-сигналов / С. С. Дворников, С. В. Селиванов, С. В. Дворников // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 24–33. – DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-2-24-33. – EDN GIWAFM.

D. I. Plehakov, student

I. A. Arslanov[✉], student

E. G. Bulatova, CSc in phys. and math., assoc. prof.

V. A. Sidorina, CSc in pedagogics, assoc. prof.

E-mail: arslanovildar0@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Measuring the Benefits of Noise Immunity of Low-Frequency Signals Using Step-by-Step Manipulation

The article considers the results of an experiment based on a stochastic model of signal transceiver with LFM manipulation. The MATLAB 2013 batch environment was chosen for the experiments. A comparative analysis of two types of manipulation was carried out based on the dependencies of noise immunity to narrowband interference at different power ratios.

Keywords: Linear frequency modulation, Narrowband noise, MATLAB, noise immunity, types of manipulation.

УДК 004.822

Д. Р. о. Угузов , студент

Е. М. Зайцева, канд. пед. наук, доц.

E-mail: danil.ugg@mail.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Использование технологии искусственного интеллекта в системах видеонаблюдения

В статье рассматривается, как система видеонаблюдения подключается к искусственному интеллекту и как искусственный интеллект используется в системах видеонаблюдения в современном мире.

Ключевые слова: искусственный интеллект, технология искусственного интеллекта, система видеонаблюдения, видеокамера.

Введение

Искусственный интеллект (ИИ) – это совокупность инструментов и алгоритмов, разрабатываемых для решения человеческих задач, превосходя человеческие возможности. Одно из ключевых свойств ИИ – гибкость в применении: его можно связать с разными устройствами, к примеру с системой видеонаблюдения. В настоящее время системы видеонаблюдения используются в разных сферах жизни: системы охранного телевидения, наблюдение за объектами или распознавание биометрических данных и т. д. Видеонаблюдение с искусственным интеллектом упрощает работу, улучшает качество и расширяет перечень задач. В данной статье мы подробно рассмотрим использование искусственного интеллекта в системах видеонаблюдения и как подключить видеокамеру к искусственному интеллекту. Будут представлены примеры использования технологий искусственного интеллекта вместе с видеокамерами.

Связь между видеокамерой и искусственным интеллектом

Чтобы создать систему видеонаблюдения с искусственным интеллектом, легче всего подключить видеокамеру к персональному компьютеру (в качестве персонального компьютера может выступать ноутбук

или цельный компьютер). Существует два способа подключения: проводной и беспроводной.

В современной тенденции чаще выбор падает на беспроводной способ подключения. Видеокамеру настраивают с помощью смартфона или в ручной настройке. Затем видеокамеру устанавливают и включают. Сигнал подается на роутер, который подключен к персональному компьютеру. Такие видеокамеры классифицируются как IP-видеокамеры [1].

В качестве примера оборудования рассмотрим IP-видеокамеру Hi-Watch DS-i202 (E), которую можно подключить к персональному компьютеру и в которую можно встроить искусственный интеллект. Она имеет купольный вид, предназначена для улицы, у нее высокое качество изображения с разрешением 2 Мп, обнаружение цели по типу «Человек», защита от влаги и пыли, антивандальная защита, технология эффективного сжатия H.265+ и улучшенная инфракрасная технология с большой дальностью. Технические характеристики видеокамеры приведены в таблице [2].

Таблица 1. Технические характеристики IP-видеокамеры HiWatch DS-i202 (E)

Параметры	Технические характеристики
Матрица	1/2.9 Progressive Scan CMOS
Максимально разрешение	1920 × 1080
Тип объектива	Фиксированный: 2.8, 4 и 6 мм
Режим «День/ночь»	ИК-фильтр
Регулировка угла установки	Поворот: от 0 до 360°; наклон: от 0 до 90°; вращение: от 0 до 360°
Основной поток	50 Гц: 25 к/с (1920×1080, 1280×720)
Видеосжатие	H.265+ / H.265 / H.264+ / H.264
Питание	DC 12 В ± 25 %, 0.4 А, макс. 5 Вт, коаксиальный разъем питания Ø 5.5 мм

В проводном способе роутер заменяется на устройство обработки сигнала, в качестве которого чаще всего выступает видеорегистратор. Существенный минус данного способа – это наличие кабелей. Подключение от видеокамеры до устройства обработки и от него до персонального компьютера осуществляется за счет проводов. Таким образом, это выходит дороже, чем беспроводное подключение, и менее надежно, ведь кабели могут деформироваться и нарушать работу системы [1].

В обоих способах подключения конечной точкой является персональный компьютер, на который и можно адаптировать искусственный интеллект. Через этот же компьютер можно анализировать данные с видеокамер. К примеру, WizSense – ИИ, который использует алгорит-

мы глубокого обучения (Deep Learning) и может подключиться к видеокамерам. Интеллект может распознавать лица людей и автомобили [3].

Использование искусственного интеллекта в системах видеонаблюдения

Видеонаблюдения уже используется в разных сферах жизни: контроль за соблюдением режима на территории исправительных учреждений, распознавание номерных знаков автомобилей, распознавание лиц и многое другое. К каждому из применений можно подключить искусственный интеллект, который будет упрощать работу, улучшать качество или расширять тип решаемых задач [4].

К примеру, установленная уличная камера с технологией искусственного интеллекта может анализировать лица прохожих, среди которых может оказаться преступник. Автоматическое распознавание номеров позволяет открыть доступ к объекту только для ограниченного количества автомобилей [5]. Камеры видеонаблюдения на территориях исправительных учреждений могут анализировать эмоции и движения заключенных. Данные с видеокамер с технологией искусственного интеллекта можно использовать при составлении информации для дальнейшего анализа. К примеру, сколько людей проходит мимо культурного наследия, сколько машин проезжает через контрольно-пропускной пункт или сколько человек содержится в исправительных учреждениях.

С помощью искусственного интеллекта WizSense можно создать систему защиты частной собственности: при обнаружении постороннего лица или автомобиля система подает сигнал тревоги. Особенность этой технологии в том, что она может дать краткую характеристику личности: определить пол, примерный возраст, выражение лица, присутствие аксессуаров, которые могут закрывать лицо. Для автомобиля система тоже дает краткую характеристику: цвет, марка, номер [3].

Технологию искусственного интеллекта с системой видеонаблюдения можно использовать и для создания других систем. К примеру, для создания системы электронного хронометража для беговых видов спорта. На финише устанавливается IP-видеокамера, она считывает всех участников, которые финишировали, и записывает их номера в базу данных.

В Российской Федерации на данный момент используют камеры с искусственным интеллектом. Их используют в подъездах, на улицах или на дорожном движении. Камеры с ИИ устанавливаются для быстрой вычисления преступника или потерявшегося человека. Без алгоритмов нейросети человеку пришлось бы лично выявлять каждую личность, что дорого и нецелесообразно [6].

Заключение

Система видеонаблюдения является неотъемлемой частью человеческой жизни. Видеокамеры устанавливаются везде, и для улучшения работы используется искусственный интеллект. Это не только ускоряет и упрощает работу, но и позволяет людям не сидеть за мониторами видеокамер. В результате исследования были определены способы использования технологии искусственного интеллекта в системах видеонаблюдения.

Список использованных источников и литературы

1. Видеонаблюдение через компьютер: как организовывать систему наблюдения на ПК // bezopasnostin.ru. Россия. – URL: <https://bezopasnostin.ru/videonablyudenie/videonablyudenie-cherez-kompyuter.html> (дата обращения: 28.10.2024).
2. Видеокамера HiWatch DS-i202 (E) (2,8мм) купольная уличная 2Мп. / ООО “ДИС”. Россия. – URL: https://odis1224.ru/catalog/videonablyudenie/videokamery_ip/kupolnye_ulichnye_antivandalnye/2317/ (дата обращения: 28.10.2024).
3. *Титов, С.* На что способна система видеонаблюдения на базе искусственного интеллекта // TADVISER. Россия. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:На_что_способна_система_видеонаблюдения_на_базе_искусственного_интеллекта (дата обращения: 28.10.2024).
4. *Савенков, И. В.* Применение технологий искусственного интеллекта в современных системах видеонаблюдения / И. В. Савенков, К. В. Трифонова // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 2023.). – Воронеж : Изд-во ФКОУ Воронежский институт ФСИН России ; Изд-во «Строки». – С. 253–257. – EDN JYKLVY. (дата обращения: 28.10.2024).
5. Видеонаблюдение на основе ИИ: качество на страже безопасности // VIDEOMIR. Россия. – URL: <https://videomir.pro/stati/videonablyudenie-na-osnove-ii-kachestvo-na-strazhe-bezopasnosti/?ysclid=m2rdl8lp92873891722> (дата обращения: 28.10.2024).
6. *Кокуркин, В.* Разрушаем мифы: как и для чего ИИ используется в видеонаблюдении // Национальные проекты России. – URL: <https://национальныепроекты.рф/news/razrushaem-mify-kak-i-dlya-chego-ii-ispolzuetsya-v-videonablyudenii/> (дата обращения: 28.10.2024).

D. R. o. Uguzov , student

E. M. Zaytseva, CSc in pedagogics, assoc. prof.

E-mail: danil.ugg@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The Use of Artificial Intelligence Technology in Video Surveillance Systems

The article examines how a video surveillance system is connected to artificial intelligence and how artificial intelligence is used in video surveillance systems in the modern world.

Keywords: artificial intelligence, artificial intelligence technology, video surveillance system, video camera.

УДК 004.8

В. В. Чаругин ^{✉ a}, аспирант

В. В. Чаругин ^{✉ b}, аспирант

А. Н. Чесалин ^{✉ c}, канд. техн. наук, доц.

E-mail: ^a valera.2001@mail.ru, ^b valentin.1999@mail.ru, ^c chesalin_an@mail.ru

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Дискриминационные и генеративные алгоритмы и их применение в информационной безопасности

Статья посвящена исследованию дискриминационных и генеративных алгоритмов. В ней рассматриваются особенности этих алгоритмов, их сравнительные характеристики и возможности применения в информационной безопасности. Также анализируются новые модели, повышающие эффективность и точность обработки данных.

Ключевые слова: машинное обучение, дискриминационные модели, генеративные модели, трансформеры, кибербезопасность.

Введение

С каждым годом количество данных, доступных для анализа, растет, и для их обработки применяются разнообразные подходы. Среди всех подходов наибольшую актуальность приобретают алгоритмы машинного обучения. Они позволяют выявлять скрытые закономерности, строить прогнозы и принимать более обоснованные решения. Благодаря таким возможностям алгоритмы машинного обучения становятся важным инструментом в различных областях, включая информационную безопасность, где они помогают выявлять угрозы и защищать данные от киберпреступников. В данной статье рассматриваются различия между генеративными и дискриминационными алгоритмами машинного обучения, их преимущества, недостатки и применимость в прикладных задачах.

Дискриминационные и генеративные алгоритмы

Машинное обучение – это технология, основанная на использовании алгоритмов, предназначенных для автоматического анализа данных. Для достижения точных и быстрых результатов необходимо подбирать оптимальный алгоритм, который позволяет эффективно решать постав-

ленные задачи. Существует большое количество алгоритмов машинного обучения, и каждый из них предназначен для конкретных целей, таких как анализ, классификация данных или их генерация. В зависимости от подхода все алгоритмы можно разделить на две категории: дискриминационные и генеративные.

Дискриминационные алгоритмы ориентированы на разделение данных по классам (меткам) и позволяют точно определить принадлежность новых данных к определенной группе. Среди дискриминационных алгоритмов выделяются алгоритмы градиентного бустинга и алгоритмы на основе архитектуры трансформеров. Алгоритмы градиентного бустинга, такие как XGBoost, LightGBM и CatBoost, используются для классификации и регрессии, объединяя множество слабых моделей для повышения общей точности предсказания, и в основном разработаны для работы с числовыми данными [1]. Алгоритмы, основанные на архитектуре трансформеров, такие как BERT и RoBERTa, предназначены для классификации и анализа различных типов данных.

Генеративные алгоритмы используются для создания новых данных, которые имеют схожие характеристики с исходными. К основным группам генеративных алгоритмов относятся генеративно-состязательные сети, вариационные автокодировщики и алгоритмы на основе архитектуры трансформеров. Генеративно-состязательные сети (GAN) состоят из генератора и дискриминатора. Генератор создает новые данные, а дискриминатор пытается определить, являются ли эти данные настоящими или сгенерированными. Вариационные автокодировщики (VAE) применяются для восстановления и анализа данных в условиях их недостаточности, дополняя недостающую информацию и воссоздавая ключевые элементы [2]. Алгоритмы, основанные на архитектуре трансформеров, такие как GPT-3, T5 и YaGPT (и рассмотренные в [3]), способны создавать данные, учитывая различные зависимости и закономерности.

Сравнение особенностей генеративных и дискриминационных алгоритмов

При рассмотрении дискриминационных и генеративных алгоритмов можно выделить ряд особенностей, рассмотренных в табл. 1. [4]

При рассмотрении структуры и методологии дискриминационных и генеративных алгоритмов можно выявить следующие преимущества и недостатки, представленные в табл. 2.

Выбор дискриминационного или генеративного алгоритма зависит от специфики задачи, доступных данных и требуемой точности.

Таблица 1. Особенности алгоритмов

	Дискриминационные алгоритмы	Генеративные алгоритмы
Подход к обработке данных	Основываются на определенных конкретных признаках	Изучают внутренние связи и закономерности в данных
Области применения	Применяются в задачах регрессии и классификации	Применяются в задачах создания, дополнения и восстановления данных, а также в обобщении

Таблица 2. Сравнение дискриминационных и генеративных алгоритмов

	Дискриминационные алгоритмы	Генеративные алгоритмы
Обработка данных без меток	Требуются метки для работы	Нет необходимости в метках
Чувствительность к шуму	Устойчивы к шуму и выбросам	Подвержены влиянию шума и выбросов
Вычислительные затраты	Менее требовательны к ресурсам	Требуют больших вычислительных мощностей

Применение дискриминационных и генеративных алгоритмов в информационной безопасности

Дискриминационные и генеративные алгоритмы находят широкое применение в информационной безопасности. Они расширяют возможности анализа данных, предлагая различные подходы для выявления угроз, улучшения их отслеживания (например, в задаче структурирования журналов в области информационной безопасности [5]) и предотвращения. Ниже приведено описание того, как каждый тип алгоритмов способствует усилению защиты информации и предотвращению угроз [6]:

1. Дискриминационные алгоритмы:

а) Алгоритмы градиентного бустинга применяются для анализа сетевого трафика с целью обнаружения аномалий и классификации атак. Данные алгоритмы позволяют выявлять такие угрозы, как DDoS-атаки, попытки вторжений, подозрительную активность и атаки нулевого дня.

б) Алгоритмы на основе трансформеров используются для анализа информации различного формата с целью обнаружения потенциальных угроз, выявления нестандартных паттернов и классификации данных. С их помощью можно идентифицировать вредоносные письма, попытки социальной инженерии и аномалии в переписке или логах.

2. Генеративные алгоритмы:

а) Генеративно-состязательные сети (GAN) применяются для создания синтетических данных, которые имитируют реальные.

б) Вариационные автокодировщики (VAE) применяются для восстановления поврежденных данных, обнаружения аномалий и создания неизвестных угроз.

с) Алгоритмы на основе трансформеров применяются для создания тестовых данных для имитации атак социальной инженерии, генерации безопасного кода на основе кода с уязвимостями, а также для создания отчетов по безопасности.

Современные дискриминационные и генеративные модели

За последние годы появилось множество новых моделей, которые создавались с целью повышения точности, скорости, а также преодоления ограничений, присущих классическим моделям. С развитием задач машинного обучения появляются следующие новые модели:

1. Дискриминационные:

а) UnbiasedGBM – алгоритм градиентного бустинга, направленный на уменьшение предвзятости и повышение устойчивости к шуму [7].

б) GBDT-IL – алгоритм, представляющий собой усовершенствованный градиентный бустинг, который расширяет возможности интерпретации результатов в сложных многоклассовых задачах [8].

с) LS-LLaMA – модель на основе трансформера с улучшенным механизмом внимания, позволяющим эффективно учитывать информацию из удалённых частей текста [9].

д) LAMKIT – трансформерная модель с оптимизированным механизмом внимания, учитывающая иерархическую структуру текста [10].

2. Генеративные:

а) RG-GAN – модель, которая использует динамическое обрезание весов, чтобы улучшить качество данных, удаляя менее значимые веса и восстанавливая важные во время обучения [11].

б) VAE-GNA – это вариационный автоэнкодер, использующий добавление гауссовского шума для улучшения генерации и обобщающей способности модели [12].

с) GPT-4 – это улучшенная версия языковой модели GPT-3 с более высокой точностью, лучшим пониманием контекста, меньшей предвзятостью и поддержкой мультимодальности [13].

Ниже на рисунке представлена временная шкала появления моделей.



Рис. Временная шкала появления моделей за 2022–2024 года

Заключение

В статье проведено исследование современных дискриминационных и генеративных моделей:

- представлены особенности алгоритмов;
- отмечены современные нейросетевые модели;
- представлены возможности их применения в информационной безопасности.

Благодаря своим особенностям, дискриминационные и генеративные модели могут эффективно применяться в информационной безопасности и позволяют создавать устойчивые системы, способные эффективно противостоять актуальным киберугрозам и обеспечивать надежную защиту данных.

Список использованных источников и литературы

1. *Florek, P.* Benchmarking state-of-the-art gradient boosting algorithms for classification / P. Florek, A. Zagdański // arXiv. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2305.17094.
2. Advancements in generative AI: A comprehensive review of GANs, GPT, autoencoders, diffusion model, and transformers / S. Bengesi, H. El-Sayed, M. K. Sarker, Y. Houkpati, J. Irungu, T. Oladunni // IEEE Access – 2024. – Vol. 12. – Pp. 69812-69837. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3397775.
3. *Чаругин, В. В.* Анализ и формирование наборов данных сетевого трафика для обнаружения компьютерных атак / В. В. Чаругин, В. В. Чаругин, А. Н. Чесалин // International Journal of Open Information Technologies. – 2023. – Vol. 11, no. 6. – ISSN: 2307-8162.
4. *Nanda, A.* Generative vs discriminative models: Differences & use cases / A. Nanda // datacamp. – URL: <https://www.datacamp.com/blog/generative-vs-discriminative-models> (дата обращения: 30.10.2024).
5. Constructor of natural language processing blocks and its application in the problem of structuring logs in information security / В. В. Чаругин, В. В. Чаругин, А. Н. Чесалин, Н. Н. Ушакова // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Vol. 12, no. 9. – ISSN: 2307-8162.
6. Explainable AI for cybersecurity automation, intelligence and trustworthiness in digital twin: Methods, taxonomy, challenges and prospects / I. Sarker, H. Janicke,

A. Mohsin, A. Gill, L. Maglaras // ICT Express. – 2024. – Vol. 10. – Iss. 4. – Pp. 935-958. – DOI: 10.1016/j.ict.2024.05.007.

7. Zhang, Z. Unbiased gradient boosting decision tree with unbiased feature importance / Z. Zhang, T. Zhang, J. Li // arXiv. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2305.10696.

8. GBDT-IL: Incremental learning of gradient boosting decision trees to detect botnets in Internet of Things / R. Chen, T. Dai, Y. Zhang, Y. Zhu, X. Liu, E. Zhao // Sensors. – 2024, 24 (7). – Art. no. 2083. – DOI: 10.3390/s24072083.

9. Label supervised LLaMA finetuning / Z. Li, X. Li, Y. Liu, H. Xie, J. Li, F. Wang, Q. Li, X. Zhong // arXiv. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2310.01208.

10. Guangzeng, H. Length-aware multi-kernel transformer for long document classification / G. Han, J. Tsao, X. Huang // arXiv. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2405.07052.

11. RG-GAN: Dynamic regenerative pruning for data-efficient generative adversarial networks / D. Saxena, J. Cao, J. Xu, T. Kulshrestha // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2024, 38(5). – Pp 4704-4712. – DOI: 10.1609/aaai.v38i5.28271.

12. Rocha, M. VAE-GNA: A variational autoencoder with Gaussian neurons in the latent space and attention mechanisms / M. Rocha, R. Krohling // Knowledge and Information Systems. – 2024. – Vol. 66. – Pp. 6415–6437. – DOI: 10.1007/s10115-024-02169-5.

13. GPT-4 technical report / J. Achiam, S. Adler, S. Agarwal, L. Ahmad, I. Akkaya, F. Aleman et al. // arXiv. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2303.08774.

V. V. Charugin^a, postgraduate

V. V. Charugin^b, postgraduate

A. N. Chesalin^c, CSc in engineering, assoc. prof.

E-mail: ^a valera.2001@mail.ru, ^b valentin.1999@mail.ru, ^c chesalin_an@mail.ru

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Discriminative and Generative Algorithms and Their Application in Information Security

The article is devoted to the study of discriminatory and generative algorithms. It examines the features of these algorithms, their comparative characteristics and the possibilities of application in information security. New models that increase the efficiency and accuracy of data processing are also being analyzed.

Keywords: machine learning, discriminatory models, generative models, transformers, cybersecurity.

УДК 004.942

А. К. Черных, магистрант
М. И. Владыкин, магистрант
А. С. Коротков, магистрант
К. В. Черных, вед. инженер-конструктор – рук. группы
В. А. Сидорина ✉, канд. пед. наук, доц.
E-mail: vasidorina@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Разработка коммутатора цифровых дискретных сигнальных датчиков

В статье рассмотрены основные разновидности датчиков, принципы работы коммутаторов, основные варианты подключения и принципы коммутации. По результатам анализа была разработана схема электрическая структурная коммутатора цифровых дискретных сигнальных датчиков.

Ключевые слова: коммутатор датчиков, цифровые сигналы, телеметрическая система, схема электрическая структурная, плата устройства.

Введение

В современном мире передача и обмен информации стали неотъемлемой частью многих сфер нашей жизни. Одним из основных компонентов в рамках передачи информации является коммутатор.

Коммутатор, он же switch (переключатель) – электронное устройство, предназначенное для объединения нескольких персональных компьютеров, прочих цифровых приборов в одну сеть с целью обеспечения обмена данными между ними. Он способен получать информацию на один порт и передавать ее на другой в соответствии с таблицей MAC-адресов. Составляет карту доставки коммутатор самостоятельно на основании данных, проходящих через его порты. Он запоминает пути передачи файлов, записывает их в таблицу. И уже при последующем сеансе передает ее по нужному адресу [1, 2].

Особую роль коммутаторы играют в телеметрии, поскольку предназначены для приема информации датчиков, при необходимости ее первичной обработки и выдачи данной информации узлам верхнего уровня

по их запросу. Этим и обусловлена значимость коммутаторов и их разработки.

По характеру выходного сигнала все датчики делятся на несколько основных классов [3, 4]:

- Аналоговые датчики на выходе имеют непрерывный выходной сигнал, для снятия которого необходимо использовать аналого-цифровой преобразователь, после чего следует произвести преобразования значения АЦП в формат измеряемой величины.

- Цифровые датчики, информация с которых снимается с помощью различных цифровых интерфейсов. Как правило, информация доступна непосредственно в формате измеряемой величины и не требует проведения дополнительных преобразований.

- Дискретные датчики, имеющие только два варианта сигнала на выходе канала датчика – лог. 0 и лог. 1. Примером такого датчика является конечный выключатель, имеющий состояния «замкнут» и «незамкнут». Дискретный датчик может иметь несколько выходных каналов, каждый из которых находится в одном из двух состояний. Например, 12-разрядный абсолютный датчик положения.

- Импульсные датчики, формирующие импульсы выходного сигнала, амплитуда или длительность которых зависит от измеряемой величины. Например, инкрементальный датчик положения формирует на выходе код Грея. При этом чем выше частота вращения вала датчика, тем большая частота сигнала будет на выходе, что позволит с высокой точностью определить частоту вращения вала.

В нашем случае осуществляется моделирование коммутатора дискретных цифровых сигнальных датчиков. Коммутаторы цифровых сигнальных датчиков предназначены для приема дискретной информации. Используются в телеметрических системах главным образом для контроля дискретных состояний процессов в телеметрируемой аппаратуре.

Постановка задачи

Необходимо разработать схему электрическую принципиальную платы прибора, выполняющего функции коммутатора дискретных цифровых сигнальных датчиков и способного осуществлять сбор информации с дискретных цифровых сигнальных датчиков, выработку сигналов напряжения питания датчиков, выработку собственных служебных параметров, выдачу информации датчиков и служебных параметров по адресному запросу со стороны узла верхнего уровня по интерфейсу RS-485 в формате универсального интерфейса обмена информацией.

Способы подключения датчиков

Основные способы подключения датчиков к коммутатору представлены на рис. 1–3.

Окончательная схема входных информационных цепей коммутатора должна быть рассчитана таким образом, чтобы обеспечивать подключение любого из указанных типов датчиков к любому входу.

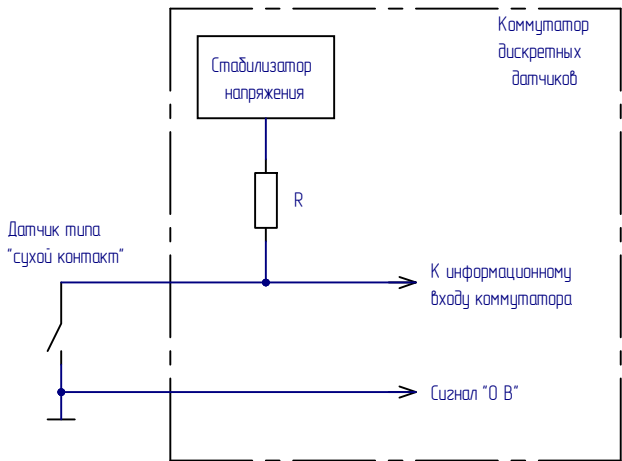


Рис. 1. Подключение к коммутатору датчиков типа «сухой контакт»

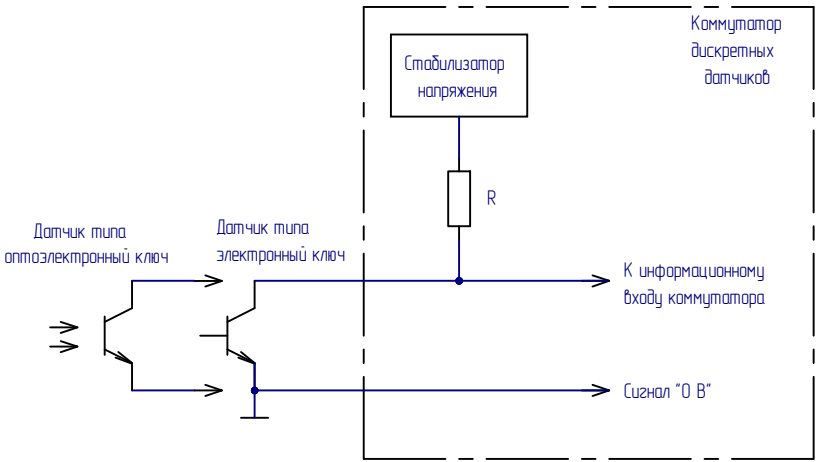


Рис. 2. Подключение к коммутатору датчиков типа «электронный ключ»

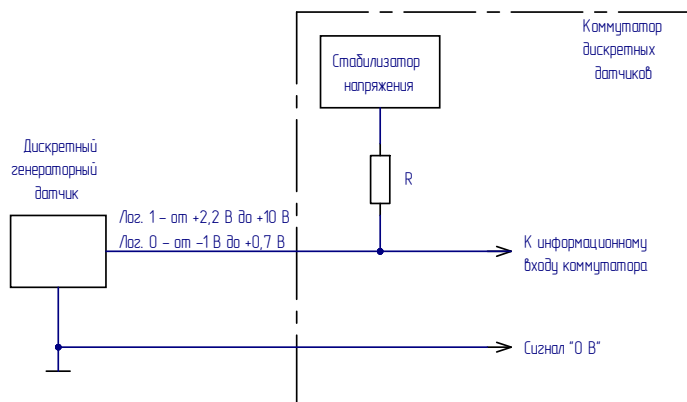


Рис. 3. Подключение к коммутатору дискретных генераторных датчиков

Реализация основных принципов коммутации

Структурная схема реализации принципа коммутации датчиков приведена на рис. 4. Данная схема является наиболее оптимальной в отношении потребления, точности и быстродействия, поэтому делаем выбор именно в пользу данного варианта реализации.

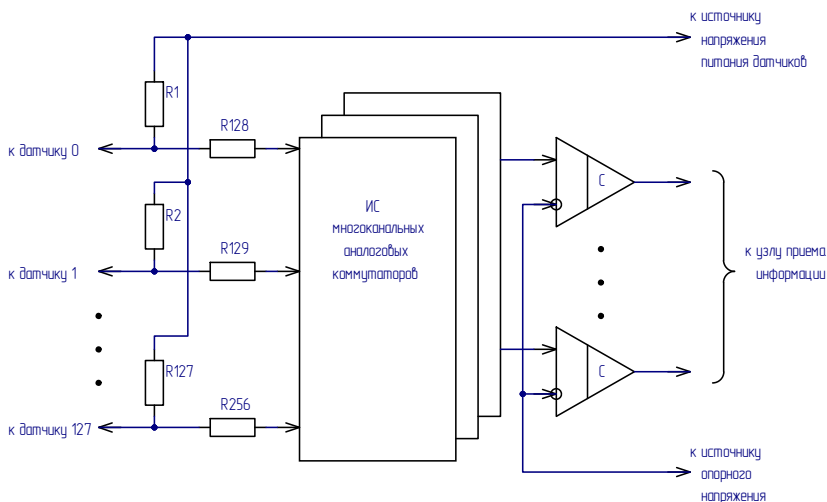


Рис. 4. Вариант схемы реализации коммутатора с использованием ИС многоканальных аналоговых коммутаторов

Результаты разработки

В качестве среды автоматизированного проектирования был выбран Altium Designer. Altium Designer представляет собой систему сквозного автоматизированного проектирования электронных средств (РЭС) на базе печатных плат и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [5].

По результатам анализа исходных требований к коммутатору датчиков разработана структурная схема одного полукомплекта коммутатора Ц128-ЭМ. Второй полукомплект будет аналогичен первому в силу идентичности его функционала. Это необходимо для реализации устройства в двух полукомплектах – основном и резервном. При выходе из строя одного из полукомплектов схема способна переключиться на альтернативный.

Структурная схема приведена на рис. 5.

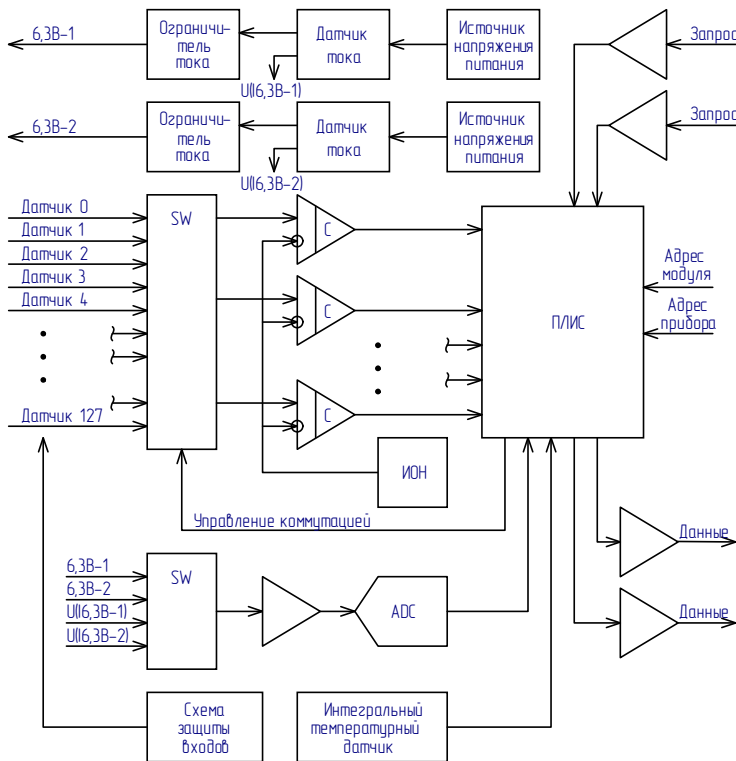


Рис. 5. Структурная схема отдельного полукомплекта коммутатора Ц128-ЭМ

На данной схеме представлено подключение 128 датчиков к мультиплексорам (блок SW) (по одному на каждые 32 сигнала), которые, в свою очередь, обрабатывают поступающую на их вход информацию с датчиков и осуществляют выборку, какие сигналы передать дальше на компараторы (блок C). Схема защиты входов реализуется посредством использования в схеме электрической принципиальной микросхем стабилизаторов и резисторов. После выходов мультиплексоров сигналы поступают на буферы компараторов, представленных в виде микросхем, где сравниваются с опорным уровнем напряжения, равным 3,3 В (генерируемым источником опорного напряжения – блок ИОН), после чего поступают на микросхему программируемой логической интегральной схемы (блок ПЛИС), управляющую адресными входами мультиплексора. На ПЛИС через микросхемы буферов данных также поступает информация о номере устройства и платы, с которой запрашивается информация. Сама ПЛИС обрабатывает поступающую информацию и выдает ее через микросхему буфера данных на узлы верхнего уровня (в том числе других плат) по контактным площадкам платы коммутатора. На рисунке также присутствуют схемы выработки сигналов напряжения и тока первого и второго источника питания для основного и резервного полукompлекта, поступающего через аналого-цифровой преобразователь (блок АЦП) на ПЛИС.

Вывод

В данной работе была разработана схема электрическая структурная полукompлекта коммутатора цифровых дискретных сигнальных датчиков. Спроектированное устройство имеет перспективы применения в разрабатываемой телеметрической системе «АРКТИКА-М» и будет доступно для дальнейшей модернизации (в том числе при разработке коммутаторов датчиков иных типов) на более поздние и высокотребовательные телеметрические системы.

Список использованных источников и литературы

1. Черных, К. Реализация коммутаторов цифровых и аналоговых датчиков с помощью ИС контроллера телеметрии LX7730 от компании Microsemi / К. Черных, А. Подгорбунский // Компоненты и технологии. – 2016. – № 8 (181). – С. 108–111. – EDN USRAYY.
2. Комиссарова, А. К. Разработка средств отображения коммутатора аналоговых и дискретных сигналов комплекса для разработки и отладки проектов АСУ ТП / А. К. Комиссарова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. двадцать третьей Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва, 02–03 марта 2017 г. : в 3 т. – Т. 1. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2017. – С. 160. – EDN ZIJFUR.

3. *Семенов, А. К.* Разработка многоканального коммутатора для RFID систем / А. К. Семенов, В. М. Иськив // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Донецк, 24–25 мая 2017 г. – Т. 6. – Донецк : Донец. нац. техн. ун-т, 2017. – С. 13–15. – EDN XOMOFU.

4. *Есауленко, В. Н.* Струйный коммутатор датчиков скважинной телеметрической системы / В. Н. Есауленко, В. С. Шкодин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 10. – С. 4–7. – EDN WNFMDT.

5. *Трушкин, Е. С.* Разработка имитационной модели многопортового коммутатора в системе Anylogic / Е. С. Трушкин, А. В. Гаврилов // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2024. – Т. 1. – С. 431–436. – EDN EMYJIK.

A. K. Chernyh, master student

M. I. Vladykin, master student

A. S. Korotkov, master student

K. V. Chernyh, leading design engineer – group leader

V. A. Sidorina ✉, CSc in pedagogics, assoc. prof.

E-mail: vasidorina@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Development of a Switch for Digital Discrete Signal Sensors

This article is devoted to the study of the main types of sensors, principles of operation of switches, basic connection options and switching principles. As a result of the development, an electrical structural circuit diagram of a digital discrete signal sensors switch was created.

Keywords: sensor switchboard, digital signals, telemetry system, electrical structural circuit, device board.

Секция 5. Физико-математические методы в приборостроении

УДК 517.958

И. С. Веселков^{✉ a}, аспирант
О. М. Немцова^{✉ b}, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр.
E-mail: ^a nerorus97@gmail.com, ^b olganemtsova@udman.ru
Удмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Применение симплекс-метода для поиска априори неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода^{*}

В работе предложен метод реализации априорных ограничений на параметры ядра интегрального уравнения, который позволяет получать физически достоверное решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Применение метода регуляризации Тихонова в сочетании с итерационным алгоритмом на основе симплекс-метода позволяет определять значения параметров ядра уравнения в заданном диапазоне.

Ключевые слова: симплекс-метод, интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода, некорректная задача.

Введение

Математической моделью многих задач экспериментальной физики является интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода. Хорошо известно, что уравнение Фредгольма 1-го рода в случае экспериментально заданной правой части уравнения является некорректно поставленной задачей и для ее решения успешно используются специальные методы (регуляризации Тихонова, прямого моделирования, многопараметрической оптимизации и др.) [1]. Однако при построении математической

модели нового объекта или явления не всегда можно точно указать количество значимых параметров модели, их точные значения, функциональные связи и т.п. Например, при анализе мёссбауэровских спектров новых материалов невозможно априори точно указать количество спектральных составляющих и точные значения параметров ядра интегрального уравнения [2]. Для решения этой проблемы успешно используется итерационный алгоритм регуляризации Тихонова с коррекцией параметров ядра и учетом априорных ограничений на искомое решение [3]. Но алгоритм работоспособен лишь при условии задания начальных значений параметров в малой окрестности точных значений. Если начальные значения параметров будут указаны неверно, то можно получить значения, не имеющие физического смысла, то есть вне диапазона допустимых значений.

Постановка задачи

Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода в общем виде может быть записано следующим образом:

$$\int_a^b K(s, t)x(s)ds = y(t), \quad t \in [c, d], \quad (1)$$

где $x(s)$ – искомое решение есть непрерывная и дифференцируемая функция $s \in [a, b]$; $y(t)$ – полученные экспериментально значения с известным уровнем погрешности $\|y_\delta - y\| \leq \delta$.

Если ядро уравнения $K(s, t)$ является заданной функцией, то для решения задачи (1) успешно используется классический метод регуляризации Тихонова [1]. Если ядро уравнения $K(\mathbf{p}, s, t)$ зависит от вектора параметров $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, точные значения которых априори не известны, то применяется специальный итерационный алгоритм [3]. Этот алгоритм построен на двух методах: методе регуляризации Тихонова и методе Гаусса – Ньютона, с помощью которого выполняется поиск априори неизвестных значений параметров.

Хорошо известно, что экспериментальный мёссбауэровский спектр состоит из спектральных составляющих лоренцевой формы, каждая из которых может иметь свои значения параметров сверхтонкого взаимодействия: $K(\mathbf{H}, \mathbf{Q}, s, t)$, $K_l(\mathbf{H}, \mathbf{Q}, \Delta E_l, s, t)$, $K_l(\mathbf{S}_l, \mathbf{Q}, \Delta E_l, s, t)$. Эти параметры $\mathbf{S}_l, \mathbf{H}, \mathbf{Q}, \Delta E_l$ характеризуют электрические и магнитные взаимодействия атомного ядра с окружающими его электронной и атомной подсистемами и при изучении новых материалов значения этих параметров, как правило, неизвестны. Применение специального итерационного алгоритма [3] позволяет одновременно находить неизвестные значения параметров сверхтонкого взаимодействия и соответствующие им спектральные составляющие. Однако иногда возникает ситуация,

когда найденные методом Гаусса – Ньютона значения параметров не имеют физического смысла, поскольку выходят за *диапазон допустимых значений для данных параметров*.

При построении математической модели в виде интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода параметры ядра, как правило, описывают некие физические/химические или другие свойства изучаемого объекта, и всегда существует диапазон возможных значений этих параметров. Метод Гаусса-Ньютона не может гарантировать, что найденные с его помощью значения окажутся в заданном диапазоне. Необходим другой метод нахождения неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения, гарантирующий получение значений внутри заданного диапазона.

Симплекс-метод поиска априори неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения

Сформулируем задачу иначе: найти такие значения параметров, которые находятся внутри выпуклой многомерной области, не увеличивают невязку уравнения (при фиксированном на данной итерации решении интегрального уравнения) и обеспечивают минимум целевой функции. Тогда задача определения неизвестных значений параметров ядра уравнения становится задачей *выпуклого программирования, точнее линейного программирования*, поскольку численная реализация метода коррекции параметров (построение матрицы Якоби) выражается системой линейных алгебраических уравнений.

Классическим методом решения задачи линейного программирования является симплекс-метод, который позволяет находить решение системы неравенств при условии минимума целевой функции. Реализация симплекс-метода в итерационном алгоритме решения уравнения Фредгольма 1-го рода с неизвестными значениями параметров ядра уравнения позволила найти значения параметров, удовлетворяющих заданному диапазону допустимых значений.

Так, при обработке мёссбауэровского спектра твердого раствора многокомпонентной системы $\text{Fe}_{75}\text{Ge}_{10}\text{Sn}_{15}$ с использованием метода коррекции параметров Гаусса – Ньютона и симплекс-метода поиска значений параметров ядра уравнения в диапазоне допустимых значений при одинаковых начальных условиях были получены следующие результаты.

Все значения параметров ядра в задаче обработки мёссбауэровских спектров должны быть неотрицательными величинами (физическая априорная информация). По таблице видно, что при использовании метода Гаусса – Ньютона возникают отрицательные значения параметра 2

и параметра 4, что противоречит физическому смыслу данных параметров. Применение симплекс-метода позволило найти неотрицательные значения этих параметров (не единственность решения характерна для обратных некорректных задач). Кроме того, критерий описания экспериментальных значений теоретической кривой – критерий χ^2 (строка 5 в таблице) – показал лучшее значение при использовании симплекс-метода. Таким образом, для решения интегрального уравнения с априори неизвестными значениями параметров ядра может быть использован метод линейного программирования как способ определения значений параметров в заданном диапазоне.

Значения искомых параметров ядра уравнения

Параметры	Метод Гаусса – Ньютона	Симплекс-метод
Параметр 1 мм/с	0,148	0,149
Параметр 2 мм/с	–0,155	0,051
Параметр 3 мм/с	0,045	0,035
Параметр 4 мм/с	–0,178	0,015
Критерий χ^2	1,296	1,183

Выводы

Предложен и реализован алгоритм определения неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода, учитывающий диапазон допустимых значений искомых параметров. Итерационный алгоритм позволяет получать физически интерпретируемое решение обратной задачи с помощью метода регуляризации Тихонова и симплекс-метода поиска априори неизвестных значений параметров ядра интегрального уравнения.

Список использованных источников и литературы

1. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – Москва : Наука, 1970. – 288 с.

2. Prathap, S. Multiferroic properties and Mössbauer study of M-type hexaferrite PbFe12O19 synthesized by the high energy ball milling / S. Prathap, W. Madhuri, S. S. Meena // Materials Characterization. – 2021. – Vol. 177. – P. 111168. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2021.111168>.

3. Немцова, О. М. Расшифровка мёссбауэровских спектров многокомпонентных однофазных разупорядоченных твердых растворов в рамках расширенной математической модели / О. М. Немцова, Г. Н. Коньгин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2024. – Т. 91, № 1. – С. 48–55. – EDN [PXTLYE](#).

I. S. Veselkov ^{✉ a}, postgraduate

O. M. Nemtsova ^{✉ b}, CSc in phys. and math., assoc. prof., senior researcher

E-mail: ^a nerorus97@gmail.com, ^b olganemtsova@udman.ru

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russia

Application of the Simplex Method to Find A Priori Unknown Values of the Kernel Parameters of the Fredholm Integral Equation of the First Kind

The paper proposes a method for implementing a priori constraints on the parameters of the kernel of an integral equation, which makes it possible to obtain a physically reliable solution of the Fredholm integral equation of the 1st kind. The application of Tikhonov's regularization method in combination with an iterative algorithm based on the simplex method makes it possible to determine the values of the equation core parameters in a given range.

Keywords: simplex method, Fredholm integral equation of the 1st kind, incorrect problem.

УДК 528.8

И. Е. Гусаров^{1,2}✉, аспирант, мл. науч. сотр.
А. И. Калугин^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.
Е. А. Антонов^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр
E-mail: gusarovie@udman.ru

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Удмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Параметры однозеркального лазерного сканера, формирующего траекторию в виде фигур Лиссажу

В работе представлена математическая модель, связывающая параметры кадра сканирования, формируемого за счёт движения лазерного пятна по траектории в виде фигур Лиссажу, лазерного источника и параметров движения зеркального сканирующего элемента. На основе полученной модели выведены зависимости частоты следования лазерных импульсов и частоты колебания зеркала от размера ячейки.

Ключевые слова: лазерное сканирование, фигуры Лиссажу, частота лазерного источника, частота колебания зеркал.

Введение

Для решения конкретных задач параметры лазерного сканера должны удовлетворять предъявляемым к устройству требованиям, к числу которых относятся максимальная эффективная дистанция сканирования, время полного сканирования и угловой размер исследуемой области. В то же время рассматриваемые технические требования могут быть ограничены ввиду существования взаимосвязи между параметрами отдельных элементов сканера, конструктивных особенностей устройства и характеристик режима работы лазерного сканера. Подтверждением сказанного могут служить результаты, полученные в работе [1]. Согласно им, скорость построения кадра, максимальная дистанция сканирования и угловой размер исследуемой области являются взаимосвязанными параметрами. При этом увеличение одной из названных величин повлечет за собой уменьшение двух других.

При проектировании лазерной сканирующей системы важно учитывать форму траектории сканирования, которая выбирается исходя из

решаемой задачи. Так, наиболее часто для реализации систем обзора пространства используются построчная траектория движения лазерного пятна и траектория, имеющая форму фигур Лиссажу (ФЛ). Второй тип траектории представляет интерес ввиду того, что построение ФЛ может происходить с помощью однозеркальной сканирующей системы, а это значительно уменьшает габаритные размеры устройства и делает такое решение приоритетным для целого ряда задач. Однако возникает проблема, связанная с выбором частот колебания зеркального элемента для достижения необходимых характеристик формируемого кадра [2–4].

Целью данной работы является построение математической модели, связывающей параметры кадра сканирования и лазерного источника с частотой колебания зеркального элемента.

Постановка задачи

Чтобы связать параметры движения элемента сканирования с параметрами кадра, предлагается представить траекторию движения пучка в сканируемой области, расположенной на расстоянии L с угловыми размерами θ и γ по горизонтали и вертикали соответственно (рис. 1, *а*), в виде набора одинаковых ячеек (рис. 1, *б*). В качестве ячейки принимается участок центральной области траектории, показанный на рис. 1, *а*.

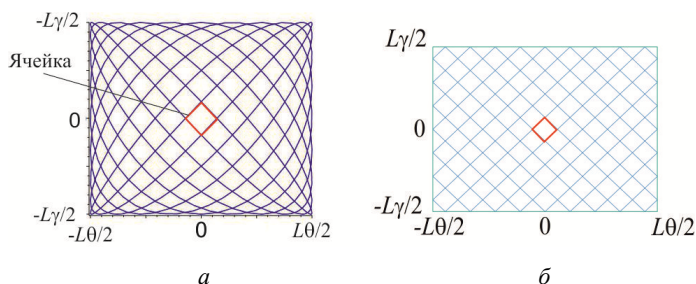


Рис. 1. Траектория движения лазерного пятна в виде фигур Лиссажу (*а*) и представление траектории сканирования в виде набора ячеек (*б*)

Число ячеек вдоль горизонтального и вертикального направления совпадает с соответствующим количеством петель ФЛ. Количество ячеек в кадре можно оценить по следующему выражению:

$$M = 2n_x n_y - (n_x + n_y - 1), \quad (1)$$

где n_x и n_y – число петель ФЛ по горизонтали и вертикали.

На рис. 2, *а* приведены габаритные размеры ячейки.

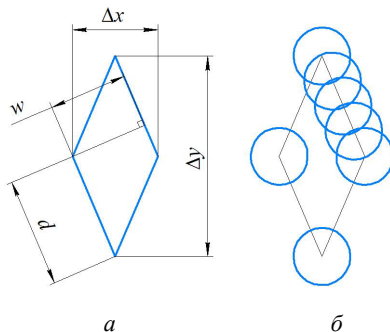


Рис. 2. Габаритные размеры ячейки (*а*) и распределение лазерных пятен вдоль контура ячейки (*б*)

Размеры ячейки Δx и Δy связаны с количеством петель ФЛ следующим образом:

$$\Delta x = \frac{\theta L}{n_x}; \quad \Delta y = \frac{\gamma L}{n_y}. \quad (2)$$

Согласно [5], распределение пятен вдоль траектории может быть описано с помощью коэффициента перекрытия, определяемого как отношение длины перекрываемой области к диаметру пятна. Примем, что центры лазерных пятен расположены по контуру ячейки равномерно и при этом каждая вершина ячейки содержит центр пятна, как показано на рис. 2, *б*. Количество пятен, содержащихся в одной ячейке с учетом перекрытия, выражается как

$$n = 4 \left(\frac{d - \eta R}{R(1 - \eta)} - 1 \right) = 4 \left(\frac{\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} - \eta R}{2}}{R(1 - \eta)} \right), \quad (3)$$

где R – радиус лазерного пятна; η – коэффициент перекрытия пятен, лежащих на грани ячейки. Тогда общее число лазерных пятен

$$N = n \cdot M. \quad (4)$$

Приняв во внимание тот факт, что пятна, принадлежащие параллельным граням ячейки, могут накладываться друг на друга с некото-

рым коэффициентом перекрытия, величина Δy может быть выражена через высоту ромба w в следующей форме:

$$\Delta y = \frac{\Delta x R}{\sqrt{\Delta x^2 \eta_c^2 - R^2}}, \quad (5)$$

где η_c – коэффициент перекрытия пятен, лежащих на параллельных гранях ячейки. Отсюда можно получить уравнение требуемой частоты следования лазерных импульсов:

$$\nu = \frac{N}{t_k} = \frac{4 \left(L \theta (L \gamma - 0,5 \Delta x) \sqrt{\Delta x^2 \eta_c^2 - R^2} - 0,5 R \Delta x (L \gamma - \Delta x) \right)}{R^2 \Delta x^2 (1 - \eta) t_k} \times \\ \times \left(\sqrt{-\frac{\Delta x^4 \eta_c^2}{R^2 - \Delta x^2 \eta_c^2}} - 2R \right). \quad (6)$$

В том случае, если частота следования импульсов для осуществления сканирования с заданными параметрами кадра может быть реализована на практике, следует перейти к определению частот колебания зеркального сканирующего элемента f_x и f_y . Частоты колебаний связаны между собой следующим образом:

$$\gcd = \frac{f_x}{n_x} = \frac{f_y}{n_y}, \quad (7)$$

где $\gcd$ – наибольший общий делитель величин f_x и f_y . Зная, что наибольший общий делитель $\gcd$ может быть выражен как обратная величина времени построения кадра [2] и используя соотношения (2) и (7), получаем:

$$f_x = \frac{\theta L}{\Delta x \cdot t_k}; \quad f_y = \frac{\gamma L}{\Delta y \cdot t_k}. \quad (8)$$

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим зависимость частоты следования импульсов (рис. 3, *а*) и частоты колебания сканирующего элемента по двум взаимно перпендикулярным осям (рис. 3, *б*) от размера ячейки. Результаты получены при следующих значениях: $\theta = \gamma = \pi/3$, $L = 1000$ м, $R = 1$ м, $\eta = \eta_c = 0,5$, $t_k = 1$ с.

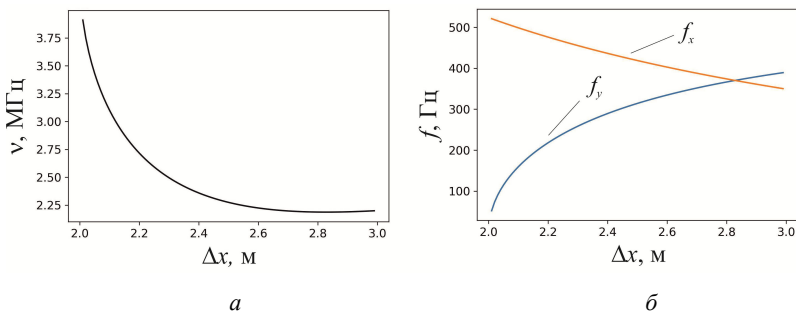


Рис. 3. График зависимости частоты следования импульсов от размера ячейки Δx (а) и графики зависимости частоты колебания сканирующего элемента от размера ячейки Δx (б)

Из рис. 3, а видно, что величина ν падает с увеличением параметра Δx , что обусловлено уменьшением плотности линий в траектории и, как следствие, снижением количества лазерных пятен в сканируемой области. Значение ν претерпевает резкий спад при увеличении размера ячейки до некоторой границы, которая в расчётном случае составляет $\Delta x = 2,6$ м. Таким образом, при проектировании сканирующего блока можно значительно снизить требования к частоте лазерного источника без снижения качества кадра. В результате анализа зависимостей, представленных на рис. 3, б, видно, что при выборе размера Δx стоит принять во внимание тот факт, что существует такой Δx , при котором частоты колебаний зеркал f_x и f_y становятся равными, что влечет за собой движение пятна в области сканирования по круговой траектории.

Выводы

В работе приведена математическая модель, связывающая параметры кадра сканирования, формируемого за счет движения лазерного пятна по траектории в виде фигур Лиссажу, лазерного источника и параметров движения зеркального сканирующего элемента. Модель основана на разбиении траектории на одинаковые равномерно расположенные ячейки, содержащие набор лазерных пятен. На основе представленной модели проведен анализ зависимости частоты следования импульсов и частоты вращения зеркала от размера ячейки. Показано, что при проектировании сканера существует возможность значительного снижения требуемой частоты следования импульсов без потери качества формируемого изображения. При этом увеличение размера ячеек разбиения

может привести к такой комбинации частот качения зеркала, при которой построение требуемой траектории становится невозможным.

Список использованных источников и литературы

1. *Калугин, А. И.* Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов / А. И. Калугин, М. Р. Зарипов, Е. А. Антонов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 9–14. – DOI 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14. – EDN PIBXRF.
2. Adaptive Lissajous scanning pattern design by phase modulation / D. Brunner, H. W. Yoo, R. Schroedter, G. Schitter // Optics Express. – 2021. – Vol. 29, no. 18. – P. 430171. – DOI 10.1364/OE.430171.
3. Frequency selection rule for high definition and high frame rate Lissajous scanning / K. Hwang, Y.-H. Seo, J. Ahn, P. Kim, K.-H. Jeong // Sci Rep. – 2017. – No. 7. – P. 14075. – DOI 10.1038/s41598-017-13634-3.
4. *Wang, J.* Design rules for dense and rapid Lissajous scanning / J. Wang, G. Zhang, Z. You // Microsystem & Nanoengineering. – 2020. – Vol. 6. – Art. no. 101. – DOI 10.1038/s41378-020-00211-4.
5. Расчёт параметров призмного дефлектора лазерного сканера / И. Е. Гусаров, А. И. Калугин, М. Ю. Альес, Е. А. Антонов // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 54–61. – DOI 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61. – EDN WIFRJL.

I. E. Gusarov^{1,2}✉, postgraduate, junior researcher

A. I. Kalugin^{1,2}, CSc in phys. and math., lead researcher

E. A. Antonov^{1,2}, CSc in phys. and math., senior researcher

E-mail: gusarovie@udman.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Parameters of a Single-Mirror Laser Scanner Generating a Trajectory in the Form of Lissajous Figures

The paper presents a mathematical model linking the parameters of a scanning frame formed by moving a laser spot along a trajectory in the form of Lissajous figures, a laser source, and the parameters of the mirror scanning element. Based on the obtained model, the dependences of the laser pulse repetition rate and the mirror rotation frequency on the cell size are obtained.

Keywords: laser scanning, laser scanner parameters, Lissajous figures, laser source frequency, mirror oscillation frequency.

УДК 51-74

С. Э. Евдокимов ^{✉ a}, аспирант
Т. Ю. Жораев ^{✉ b}, канд. техн. наук, доц.
А. В. Щагин ^{✉ c}, д-р техн. наук, проф.
E-mail: ^a serj.evdokimov@mail.ru, ^b timurzj@gmail.com, ^c acs@mieee.ru
Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники», Москва, Россия

Эффекты квантования по уровню в цифровом фильтре с большой постоянной времени и заданной разрядностью вычислителя

Производится анализ влияния дискретизации по уровню на поведение цифрового фильтра, а также зависимость необходимой разрядности от величины времени, соответствующей полюсу с наименьшим значением эквивалентной частоты переходного процесса или времени затухания, соответствующему комплексному или действительному корню.

Ключевые слова: квантование по уровню, цифровой фильтр.

Введение

Использование цифрового фильтра в системах с ограниченной разрядностью, например, с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или маломощных микроконтроллеров влечет проблемы, связанные с эффектами квантования по уровню, насыщения или перехода знака с накоплением ошибки и уменьшением области устойчивости. В [1] рассматривается вопрос устойчивости цифрового фильтра, в [2] и [3] – эффекты квантования без учета постоянных времени.

Постановка задачи

Требуется проанализировать устойчивость цифрового фильтра с использованием имитации квантования по уровню переменных состояния, операции умножения с накоплением с аккумулятором заданной разрядности на примере цифрового фильтра первого и второго порядка. А также оценить необходимую разрядность операндов и аккумулятора в зависимости от постоянной времени фильтра, обеспечивающую приемлемую точность и устойчивость.

Решение задачи

Рассматривается фильтр низкой частоты (ФНЧ) первого порядка с бесконечной импульсной характеристикой. Его независимый можно задать как условие на граничных точках – нулевой частоте и частоте Найквиста. Для этого записывается выражение частотной характеристики в общем виде с использованием z -преобразования в нормированном виде (1):

$$F(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1}}{1 + a_1 \cdot z^{-1}}. \quad (1)$$

Для нахождения комплексно-частотной характеристики (КЧХ), содержащей мнимую и действительную части в зависимости от частоты, необходимо выполнить подстановку (2), где e, j – экспонента и мнимая единица соответственно:

$$z = e^{\frac{2 \cdot j \cdot \pi \cdot f}{fd}}, \quad F(2j\pi f) = \frac{b_0 + b_1 \cdot e^{\frac{-2 \cdot j \cdot \pi \cdot f}{fd}}}{1 + a_1 \cdot e^{\frac{-2 \cdot j \cdot \pi \cdot f}{fd}}}. \quad (2)$$

ФНЧ соответствует условию единичного коэффициента усиления на постоянной составляющей при $f = 0$ и нулевого значения на частоте Найквиста $f = fd/2$.

$$F(0) = \frac{b_1 + b_0}{a_1 + 1} = 1, \quad F\left(2j\pi \frac{fd}{2}\right) = \frac{b_0 - b_1}{1 - a_1} = 0. \quad (3)$$

Решением системы (3) будут коэффициенты для цифрового фильтра (4). Постоянная времени определяется коэффициентом a_1 .

$$b_0 = \frac{a_1 + 1}{2}, \quad b_1 = \frac{a_1 + 1}{2}, \quad a_1 \in (-1, 0]. \quad (4)$$

Данный цифровой фильтр соответствует рекуррентному соотношению $y_n = b_0 \cdot x_n + b_1 \cdot x_{n-1} - a_1 \cdot y_{n-1}$, которое реализуется как операция умножения с накоплением.

Можно также записать, что значение коэффициента $a_1 = -\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{fd}\right)$, если принять частоту дискретизации равной 1 условной единице, то $a_1 = -\cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau}\right)$, где τ – постоянная времени, выраженная в количестве отсчетов. Следует отметить, что отсчеты выражены в безразмерных единицах.

Чтобы симитировать квантование по уровню с использованием вещественных чисел, блока умножения с накоплением, необходимо использовать следующие выражение (5), где $[a]$ – отсечение дробной части числа a . В общем виде произвольный сигнал квантуется выражением

$p(q)$ с разрядностью N , например, операнды и переменные состояния входных отсчетов. Операция умножения с накоплением имитируется как a_n для текущего отсчета и a_{n-1} для предыдущего, при этом b и c – входные операнды для этой операции, можно сказать, что a_n в этом случае выступает в роли аккумулятора процессора.

$$p = \frac{\lfloor q \cdot 2^N \rfloor}{2^N}, \quad a_n = \frac{\lfloor (b \cdot c + a_{n-1}) \cdot 2^M \rfloor}{2^M}. \quad (5)$$

Далее приведен результат вычислений рекуррентного фильтра для различных N и M , при этом входные отсчеты квантуются с разрядностью N , как текущий x_n , так и предыдущий x_{n-1} , операция умножения с накоплением и выходной отсчёт y_n квантуется с разрядностью M . Вычисления произведены с использованием системы символьных вычислений *Mathima* для $N = 4, 5, 6, 7$ и $M = 2N$. Функция отсечения – $\text{floor}()$. Линии 1 на рис. 1, а соответствует разрядность $N = 4$ бит, линии 4 – разрядность $N = 7$ бит, при этом постоянная времени τ фиксирована и равна 10 отсчетам. Линия 1 на рис. 1, б соответствует постоянной времени в 6 отсчетов, линии 2, 3 и 4 соответствуют τ , равному 9, 12 и 15 отсчетам, при этом разрядность N фиксирована и равна 6 бит.

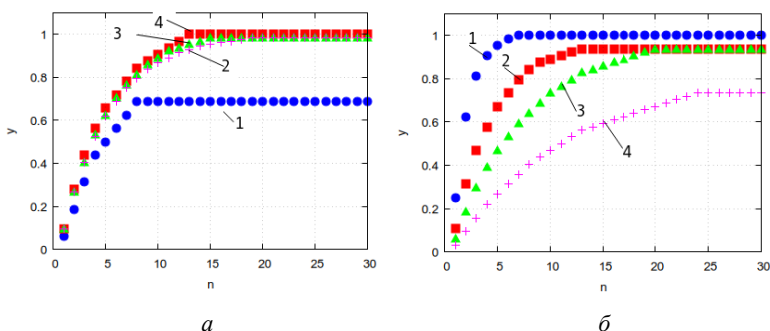


Рис. 1. Отсчеты, в зависимости от: разрядности (а); постоянной времени (б)

Выводы

Произведен анализ зависимости выходных отсчетов от разрядности цифрового фильтра при заданной постоянной времени, выраженной как количество отсчетов до установившегося режима. Показано, что при малой разрядности имеется существенная статическая ошибка. Также эта ошибка зависит от постоянной времени при заданной разрядности. Дополнительно можно отметить, что начиная с определённого отсчёта значения не меняются (для систем высшего порядка будет повторяю-

щийся периодический шаблон) при постоянном входном воздействии и эта точка также зависит от разрядности и постоянной времени. Можно предположить эмпирическое правило, что количество точек до установившегося режима пропорционально постоянной времени, умноженной на логарифм от разрядности, а требуемая величина разрядности, необходимой для обеспечения заданной точности, равна по меньшей мере логарифму от постоянной времени (с заданным коэффициентом пропорциональности).

Список использованных источников и литературы

1. Singh, V. Robust stability of 2-D digital filters employing saturation / V. Singh // IEEE Signal Processing Letters. – 2005. – Vol. 12, no. 2. – Pp. 142-145. – DOI 10.1109/LSP.2004.839704.
2. Roshanpanah, A. Design and simulation of a tunable 14-Bit IIR digital low-pass filter based on FPGA / A. Roshanpanah, H. Borhanifar // 2022 International Conference on Advanced Enterprise Information System (AEIS), London, United Kingdom. – 2022. – Pp. 152-156. – DOI 10.1109/AEIS59450.2022.00028.
3. Bugrov, V. Dynamic coefficient quantization digital FIR filter / V. Bugrov, E. Fitsov, V. Sataev, O. Kudryashova // 2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation. – 2022. – Pp. 1-4. – DOI 10.1109/DSPA53304.2022.9790770.

S. E. Evdokimov ^{✉ a}, postgraduate

T. Yu. Zhoraev ^{✉ b}, CSc in engineering, assoc. prof.

A. V. Shchagin ^{✉ c}, DSc in engineering, prof.

E-mail: ^a serj.evdokimov@mail.ru, ^b timurzj@gmail.com, ^c acs@miee.ru

National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia

Level Quantization Effects in a Digital Filter with a Large Time Constant and a Given Bit Depth of the Calculator

The effect of level sampling on the behavior of a digital filter is analyzed, as well as the dependence of the required bit depth on the time value corresponding to the pole with the lowest value of the equivalent transient frequency or attenuation time corresponding to the complex or real root.

Keywords: level quantization, digital filter.

УДК 621.375

Н. В. Кирьянов^{1, 2, ✉}, инженер-конструктор, магистрант
*Ф. А. Сизиков*², ассистент, магистрант
*А. С. Гордынец*², канд. техн. наук, доц.
E-mail: nvk46@tpu.ru

¹ Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов,
Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

Методика расчёта шумов инструментального усилителя

В статье приводится методика расчёта шумов инструментального усилителя, построенного по классической схеме на трёх операционных усилителях, которая подтверждена экспериментально. Измеренное значение напряжения шумов усилителя совпало с предсказанным.

Ключевые слова: шумы, расчет, усилители, инструментальный усилитель.

Введение

Разработка измерительной аппаратуры неизбежно сталкивается с оценкой и минимизацией собственных шумов. Для того чтобы применить тот или иной метод снижения шума, необходимо в точности понимать, какой источник стоит за его возникновением. Обычное заземление аппаратуры или ее экранирование хорошо помогают в случае, если источник шумов внешний, но если шум вызывают внутренняя структура полупроводникового элемента или пассивные компоненты, подобные методы компенсации шумов не будут иметь должного эффекта. В таком случае необходимо знать, какой компонент или каскад вносит наибольший вклад в шум.

Предварительный расчет шумов позволяет проанализировать схему и правильно подобрать компоненты для минимизации шума. В большинстве рекомендаций по их расчету предлагают произвести перемножение двух параметров полупроводниковых приборов: спектральной плотности шумов и полосы пропускания компонента [1–3]. Итоговое среднеквадратичное значение напряжения шума получается методом суммирования всех значений напряжения шума каждого элемента схемы. Например, такая методика используется в пакете схемотехнического моделирования Multisim v14.0 (National Instruments, США) [4]. Одна-

ко эта методика имеет недостатки, так как не учитываются число каскадов усиления и взаимное влияние токовых шумов полупроводников и пассивных компонентов, что сильно снижает расчетные значения относительно реально измеренных. Представленная в статье методика расчета позволит это учесть.

Методика расчета

Существует множество видов шумов в зависимости от их источников: тепловой, дробовой, импульсный шум и т. д. [3]. Шумы обусловлены физикой процессов, происходящих при протекании электрического тока [3, 5].

Характеристикой шума является его спектральная плотность. Единица измерения – $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Резистор является источником теплового шума, а ОУ – источником дробного шума из-за своей структуры [3].

За основу расчета берется методика, описанная в [6]. Расчет производился для классической схемы инструментального усилителя, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Схема инструментального усилителя выполнена по двухкаскадной схеме – входной каскад (DA1) работает в качестве повторителя сигнала. Выходной каскад – дифференциальный. Коэффициент усиления равен 1. Инструментальный усилитель выполнен на базе двух микросхем операционного усилителя (далее ОУ) – MC33272A.

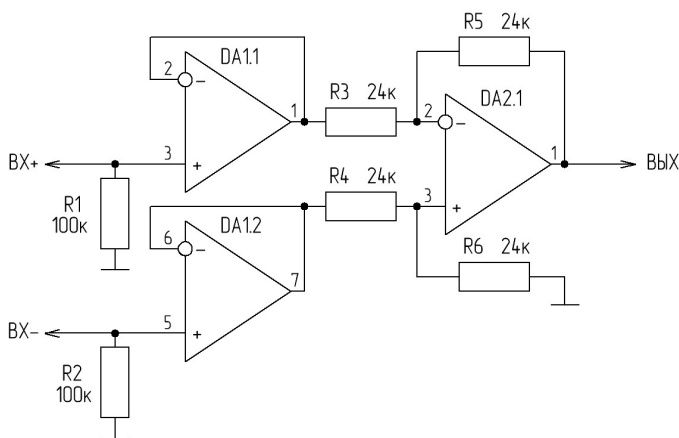


Рис. 1. Принципиальная схема инструментального усилителя

Расчет начинаем с нахождения входного напряжения шума каскада. Мощность напряжения шумов ОУ ($P_{U_{ш}}$) вычисляется по формуле [1–3]:

$$P_{U_{ш}} = S_{U_{\omega}}^2 \cdot B, \quad (1)$$

где $S_{U_{\omega}}$ – спектральная плотность шумов напряжения, В/ $\sqrt{\text{Гц}}$; B – полоса пропускания, Гц. Для микросхемы МС3327А: $S_{U_{\omega}} = 18 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Тогда: $P_{U_{ш}} = 7,8 \cdot 10^{-5} \text{ В}^2$.

Мощность токовых шумов ОУ:

$$P_{I_{ш}} = S_{I_{\omega}}^2 \cdot B, \quad (2)$$

где $S_{I_{\omega}}$ – спектральная плотность тока шума, А/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Для микросхемы МС3327А, согласно $S_{I_{\omega}} = 1 \text{ А}/\sqrt{\text{Гц}}$ *, $B = 24 \text{ МГц}$. Тогда $P_{I_{ш}} = 2,4 \cdot 10^{-17} \text{ А}^2$.

Напряжение тепловых шумов резисторов [1–3, 6]:

$$U_{шR} = \sqrt{4kTRB}, \quad (3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; R – сопротивление резистора, Ом.

Входное напряжение шумов первого каскада [3]:

$$U_{вхш} = \sqrt{8kTR_r B + U_{ш}^2 + (I_{ш} R_r)^2}, \quad (4)$$

где R_r – сопротивление входного резистора, Ом; $U_{ш} = \sqrt{P_{U_{ш}}}$ – напряжение шумов ОУ, В; $I_{ш} = \sqrt{P_{I_{ш}}}$ – ток шума ОУ, А.

Для микросхемы МС3327: $U_{ш} = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ В}$; $I_{ш} = 4,9 \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

Согласно схеме на рис. 1, $R_r = 100 \text{ кОм}$ для входного каскада. Подставив значения в формулу (4), получим $U_{вхш} = 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ В}$.

Получив входное напряжение шумов инструментального усилителя, можно найти отношение сигнал/шум. Сигнал, проходя через усилитель, приобретает некоторое значение напряжения шума. Оценить это значение можно с помощью коэффициента шума – коэффициента, показывающего отношение мощности шумов на входе к мощности шумов на выходе. Суммарный коэффициент шума двухкаскадного усилителя [6]:

* Согласно документации на микросхему, спектральная плотность шума тока равна $0,5 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, но на графике зависимости шума тока от частоты на низких частотах плотность шума тока составляет $0,6\text{--}1,3 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, поэтому взято значение $1 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$.

$$K_{\text{ш сум}} = K_{\text{ш}1} + \frac{K_{\text{ш}2}-1}{K_{P1}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{ш}n}$ – коэффициент шума n -го каскада; K_{Pn} – коэффициент усиления по мощности n -го каскада.

Коэффициент усиления по мощности [6]:

$$K_P = K_U^2 \cdot \frac{R_{\Gamma}}{R_{\text{ВЫХ}}}, \quad (6)$$

где K_U – коэффициент усиления по напряжению на холостом ходу; R_{Γ} – сопротивление источника, Ом; $R_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление схемы, Ом. Для входного каскада дифференциального усилителя: $R_{\Gamma} = 100$ кОм, $R_{\text{ВЫХ}} = 24$ кОм, $K_U = 1$. Тогда: $K_P = 4,2$.

Коэффициент шума каскада на ОУ [6]:

$$K_{\text{ш ОУ}} = 2 + \frac{U_{\text{ш}}^2 + (I_{\text{ш}} R_{\Gamma})^2}{4kTR_{\Gamma B}}. \quad (7)$$

Для входного каскада $R_{\Gamma} = 100$ кОм. Коэффициент шума для входного каскада: $K_{\text{ш ОУ}1} = 8,3$ (18,4 дБ).

Для выходного каскада $R_{\Gamma} = 24$ кОм, поэтому коэффициент шума: $K_{\text{ш ОУ}2} = 4,3$ (12,6 дБ).

Тогда коэффициент шума для инструментального усилителя, состоящего из двух каскадов, равен: $K_{\text{ш сум}} = 9,1$ (19,1 дБ).

Коэффициент шума:

$$K_{\text{ш}} = \frac{\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\text{ВХ}}}{\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\text{ВЫХ}}}, \quad (8)$$

где $\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\text{ВХ}}$ – соотношение сигнал/шум входного сигнала; $\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\text{ВЫХ}}$ – соотношение сигнал/шум выходного сигнала.

Напряжение шумов на выходе усилителя, исходя из формулы (8):

$$U_{\text{ш ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right)_{\text{ВХ}} / K_{\text{ш}}},$$

где $U_{\text{ВЫХ}} = K_U \cdot U_{\text{ВХ}}$ – среднеквадратичное значение напряжения на выходе усилителя, В. Для усилителя $U_{\text{ВХ}} = 13,3$ мВ, тогда $U_{\text{ВЫХ}} = 13,3$ мВ. Тогда, подставив значение, полученное по формуле (4), имеем: $U_{\text{ш ВЫХ}} = 5,18$ мВ.

Описание эксперимента

Для того чтобы подтвердить теоретически рассчитанное значение, был собран макет такого инструментального усилителя. В качестве входного сигнала использовалось напряжение с шунта одного из плеч диодного моста. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 2. Напряжение сети подавалось через трансформатор, понижающий сетевое напряжение до 12 В среднеквадратичного значения. Нагрузка имеет активный характер, эквивалентное сопротивление – 10 Ом. Сопротивление резистора шунта – 0,1 Ом. Среднеквадратичное значение дифференциального входного сигнала инструментального усилителя было равным 13 мВ.

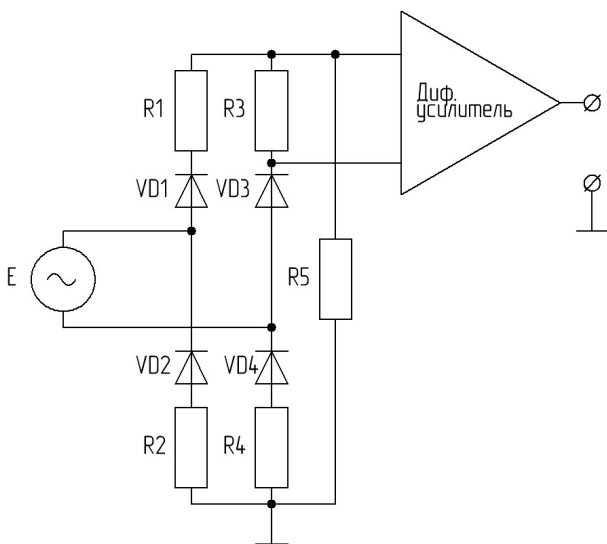


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента

Осциллограммы сигналов с усилителя представлены на рис. 3.

По результатам эксперимента измеренное среднеквадратичное напряжение шума на выходе (рис. 3, а) составило 5,15 мВ. Сравним рассчитанное значение с экспериментально полученным, найдем относительную погрешность измерений:

$$\delta = \frac{U_{\text{ш вых теор.}} - U_{\text{ш вых экс.}}}{U_{\text{ш вых экс.}}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $U_{\text{ш вых теор.}} = 5,18 \text{ мВ}$; $U_{\text{ш вых экс}} = 5,15 \text{ мВ}$. Тогда: $\delta = 0,5 \%$.

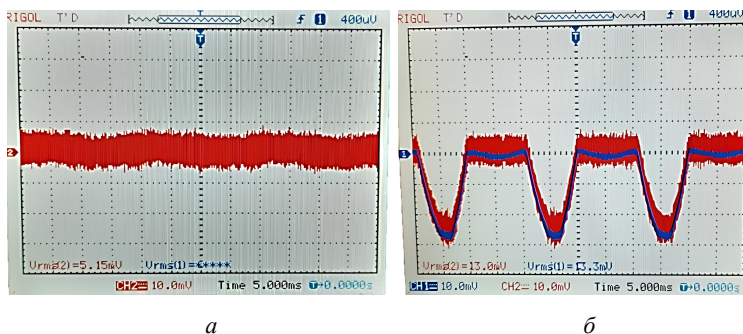


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с усилителя: без входного сигнала (а), с входным сигналом (б)

Вывод

Полученные результаты расчета и эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1) Представленная методика расчета шумов позволяет рассчитать напряжение шумов на выходе инструментального усилителя. Для подтверждения методики был произведен расчет такого усилителя на микросхеме МС33272А, собран макет и проведены испытания. Относительная погрешность расчёта составила 0,5 %.

2) При прочих равных условиях выходное напряжение шума в большей степени определяется плотностью шумов тока ОУ. При этом плотность шумов напряжения микросхемы и тепловой шум пассивных компонентов имеют минимальный вклад. При равном изменении спектральной плотности напряжения шума и тока шума, приведенного ко входу ОУ, выходное напряжение шума изменяется, как следует из расчётов, на 8 % и 400 % соответственно.

3) Для рассмотренной схемы инструментального усилителя с единичным коэффициентом передачи его каскады вносят примерно равные шумы в полезный сигнал, поскольку их коэффициенты шума равны 18,4 дБ и 12,3 дБ соответственно.

Список использованных источников и литературы

1. Денисов, Г. Шумы в электрических схемах с операционными усилителями / Г. Денисов // Электронные компоненты. – 2010. – № 3. – С. 38–40.
2. Романов, В. Шумы в операционных усилителях / В. Романов // Электронные компоненты и системы. – 2003. – № 8. – С. 12–15.
3. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – Москва : Мир, 1998. – 704 с.

4. Multisim. User Manual // National Instruments. – URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/multisim/resource/374483d.pdf?srsId=AfmBOopwDNHR4vK3YpAnXHv2-BI70r-AxnzLf0DBHF7XySQwtpGFbGss> (дата обращения: 22.10.2024).
5. *Tumye, V.* Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд. – Т. I : пер. с нем. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
6. *Omm, Г.* Методы подавления шумов и помех в электронных системах / Г. Отт. – Москва : Мир, 1979. – 318 с.
7. *Miller, D.* How to reduce noise in low-voltage amplifier designs / D. Miller // All about Circuits. – URL: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-articles/how-to-reduce-noise-in-low-voltage-amplifier-designs/> (дата обращения: 13.10.2024).

N. V. Kiryanov^{1, 2, ✉}, design engineer, master student

*F. A. Sizikov*², assistant, master student

*A. S. Gordynets*², CSc in engineering, assoc. prof.

E-mail: nvk46@tpu.ru

¹ Scientific Research Institute of Semiconductor Devices, Tomsk, Russia

² Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Instrumentation Amplifier Noise Calculation Method

The article presents a method for calculating the noise of an instrumental amplifier built according to the classical scheme on three operational amplifiers, which has been confirmed experimentally. The measured value of the amplifier noise voltage coincided with the predicted value.

Keywords: noise, calculation, amplifiers, instrumental amplifier.

УДК 535.3

Д. Н. Кочурова^{1,2,✉}, аспирант, мл. науч. сотр.
А. И. Калугин^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр.
Е. А. Антонов^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
E-mail: darya310898@gmail.com

¹ Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

² Удмуртский федеральный исследовательский центр,
Уральское отделение Российской академии наук, Ижевск, Россия

Зависимость отклонения направления распространения лазерного пучка от влажности воздуха при прохождении неоднородного участка атмосферы

В статье проведено экспериментальное исследование влияния конвективной турбулентности при различных значениях влажности на величину отклонения лазерного излучения в лазерных локационных системах.

Ключевые слова: конвективный поток, градиент температуры, влажность воздуха, локальная неоднородность, лазерная локация.

Введение

Состояние атмосферы является одним из основных факторов, влияющих на лазерный локационный сигнал. Участки атмосферы с неоднородным распределением температуры, вызванным различными техногенными и природными факторами, такими как выбросы разогретого воздуха из труб и пожары, несмотря на свои небольшие размеры (не более нескольких метров), способны отклонить лазерный пучок от начальной оси распространения. Отклонение может привести к тому, что лазерное излучение не попадет на объект или облучит лишь его часть, что может привести к недостоверным результатам при лазерном зондировании с целью распознавания объекта. В работах [1–5] проведены исследования влияния влажности и конвективной турбулентности, вызванной градиентом температуры, на распространение лазерного излучения. Однако не рассматривалось их совместное влияние на величину отклонения лазерного излучения. Целью данной работы является экспериментальное исследование величины отклонения лазерного излучения, проходящего через неоднородный участок атмосферы при различных значениях влажности.

Описание эксперимента

Для достижения поставленной цели был проведен эксперимент, схема установки которого представлена на рис. 1. Источником лазерного излучения 2 служил лазер DPSS CPS532 производства Thorlabs, излучающий на длине волны 532 нм. Источником конвективной турбулентности 3 был электрический нагреватель мощностью 500 Вт и размером нагреваемой площадки 803×80 мм, обеспечивающий нагрев поверхности до 650°C . Нагреватель располагался на расстоянии $L_1 = 2,32$ м от лазера и на расстоянии $L_2 = 2,2$ м от камеры. Расстояние H между поверхностью нагревательного элемента и оптической осью лазерного пучка изменялось в пределах от 5 до 145 мм. Смещение лазерного излучения фиксировалось видеокамерой 4 CS165CU производства Thorlabs, частота кадров составляла 18 кадров/с. Все элементы установки размещены в герметичной оптической камере. Равномерное изменение влажности воздуха достигалось с помощью увлажнителя 5 и вентилятора 6. Влажность и температура воздуха регистрировались термогигрометром 1, расположенным в противоположном от увлажнителя углу оптической камеры.

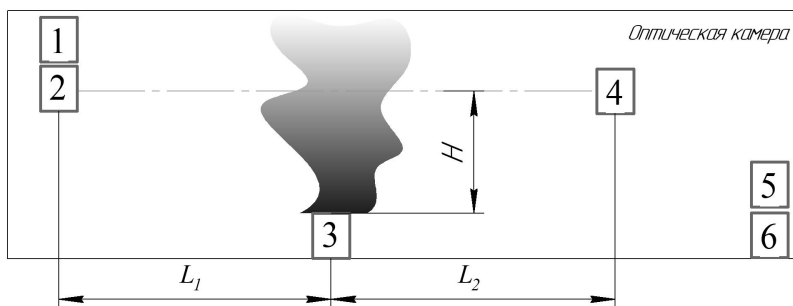


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – термогигрометр, 2 – лазерный источник, 3 – источник конвективной турбулентности, 4 – видеокамера, 5 – увлажнитель, 6 – вентилятор

Результаты и их обсуждение

В результате проведения эксперимента был получен ряд видеоизображений лазерного пятна, падающего на видеокамеру. Его радиус на камере без воздействия локального источника тепла составляет примерно 0,5 мм. Проанализировав кадры, были получены усредненные координаты центров лазерного пятна. На рис. 2 представлена зависимость вертикальной координаты на матрице камеры центра пятна Y_0 от влажности воздуха для расстояний $H = 35, 55$ и 75 мм.

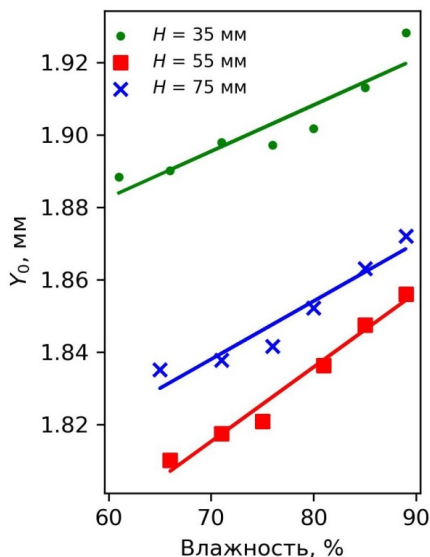


Рис. 2. Зависимость вертикальной координаты центра пятна от влажности при различных расстояниях между осью излучения и источником тепла

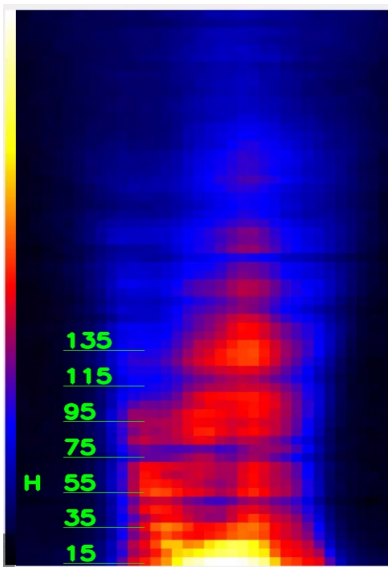


Рис. 3. Распределение температуры воздуха, нагретого электрическим нагревателем

Как видно из рисунка, зависимость является линейной (коэффициент корреляции не менее 95 %) для всех высот. С увеличением влажности происходит смещение оси лазерного пятна вверх на величину порядка 40 мкм. То есть происходит дополнительное отклонение излучения на величину 18 мкрад, которое на дистанциях до 1 км приводит к смещению 18 мм, что является незначительным для задач лазерной локации. Отметим, что данные результаты справедливы для непротяженных участков, около 12 см в нашем случае. Если лазерный пучок распространяется вдоль аналогичного участка протяженностью несколько метров, отклонение может стать значительным ~ 10 мрад.

Различия в смещениях центра пятна для разных высот объясняется различным градиентом температур, который проходит лазерный пучок. Различия заключаются как в разности температур в вертикальных слоях, так и в протяженности этого градиента (рис. 3). Большее отклонение лазерного излучения с повышением влажности можно объяснить тем, что разница показателей преломления участков среды распространения, вдоль которых распространяется пучок, ставится больше.

Выводы

Экспериментально было исследовано отклонение лазерного излучения, проходящего через локальную конвективную турбулентность при различных значениях влажности. Показано, что с увеличением влажности угол отклонения пучка возрастает и составляет порядка 18 мкрад, что приводит к смещению пучка в плоскости объекта на 18 мм на 1 км. Отклонением, вызванным конвективной турбулентностью, в том числе при высоких значениях влажности, для сильно протяженных участков можно пренебречь. Для участков размерами порядка метров необходимо учитывать данную зависимость.

Список использованных источников и литературы

1. Сазанович, В. М. Экспериментальные исследования смещения изображения лазерного пучка в турбулентной атмосфере / В. М. Сазанович, Р. Ш. Цык // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – № 12 (17). – С. 976–982. – EDN: OYGYQZ.
2. Masada, G. Propagation characteristics of laser light under the influence of atmospheric disturbance / G. Masada // Tamagawa University Quantum ICT Research Institute Bulletin. – 2021. – № 1 (11). – Pp. 27-34.
3. Razi, E. M. Effects of temperature gradient and beam path height from heat source on phase structure and mutual coherence functions of a light beam propagating through convective air turbulence / E. M. Razi, S. Rasouli // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 161. – P. 109174. – DOI 10.1016/j.optlastec.2023.109174. – EDN YRRIDM.
4. Atmospheric Characterization Based on Relative Humidity Control at Optical Turbulence Generator / J. Villamizar, M. Herreño, O. Tijaro, Y. Torres // Atmosphere. – 2019. – № 9 (10). – P. 550. – DOI 10.3390/atmos10090550.
5. Simulating a 980 nm laser beam propagation through humid air / J. Alameri, A. Bouchalkha, J. Coronel [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 10, San Diego, CA, 01–05 августа 2021 года. – San Diego, CA, 2021. – P. 118340N. – DOI 10.1117/12.2594402. – EDN DWTFXFW.

D. N. Kochurova^{1,2,✉}, postgraduate student, junior researcher

A. I. Kalugin^{1,2} CSc in phys. and math., leading researcher

*E. A. Antonov*¹, CSc in phys. and math., senior researcher

E-mail: darya310898@gmail.com

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

Dependence of the Deviation of the Direction of Propagation of a Laser Beam on the Humidity of the Air when Passing through an Inhomogeneous Region of the Atmosphere

The article presents an experimental study of the influence of convective turbulence at different humidity values on the magnitude of laser radiation deviation in laser location systems.

Keywords: convective flow, temperature gradient, air humidity, local inhomogeneity, laser location.

УДК 662.761.8.074.7

А. И. Осипенко , аспирант

П. Ф. Баранов, канд. техн. наук, директор

E-mail: Osipenkoanastasiya7@gmail.com

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

Моделирование сварочных процессов методом контрольных объемов

В данной статье описано исследование и моделирование процесса электронно-лучевой сварки по разработанной методике в математическом пакете методом контрольных объемов, которая позволяет спрогнозировать распределение температуры в свариваемой конструкции и подобрать наиболее оптимальный режим исходя из скорости движения пучка, его мощности, температуры и глубины проплавления шва, исключая деформацию элементов конструкции.

Ключевые слова: математическое моделирование, сварочный процесс, объемные сегменты, поверхностные сегменты, мощность тепловыделения, скорость электронного пучка.

Введение

Сварочный процесс – один из тех процессов, к которому предъявляются жесткие требования в плане качества, функциональности, а также надежности полученного сварного шва и конструкции. На сегодняшний день для определения оптимального режима сварки и прогнозирования распределения тепловых полей в свариваемой конструкции при электронно-лучевой сварке наиболее удобным инструментом является математическое моделирование, которое позволяет ускорить процесс оптимизации и сократить издержки на проведение экспериментов.

Цель исследования заключается в разработке модели и методики моделирования сварочного шва, которые позволят выбрать оптимальные параметры: скорость движения, энергию луча, его диаметр, ускоряющее напряжение при сваривании конструкций с толщиной стенок от 0,5 мм, при которых не произойдет изменения толщины и габаритов, а полученный шов будет ровным, герметичным и выдержит все механические нагрузки.

Представленная работа посвящена решению задачи теплопередачи в процессе электронно-лучевой сварки трудносвариваемого алюминия-

вого сплава 1370 Al-Mg-Si-Cu методом контрольных объемов с применением программного комплекса SolidWorks FlowSimulation. Для верификации полученных данных приведены результаты расчета методом конечных элементов с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics.

Метод контрольных объемов для моделирования сварочного процесса

Для решения поставленной задачи расчета температурных полей в свариваемых элементах в условиях вакуума или присутствия защитной атмосферы решаются следующие уравнения [1–2].

Уравнение сохранения энергии для текучей среды:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + \bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v} \right) + S_h, \quad (1)$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}, \quad (2)$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT, \quad (3)$$

$$e = h - \frac{p_{op} + p}{\rho}, \quad (4)$$

$$k_{eff} = k + k_t. \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии для твердотельных тел:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h, \quad (6)$$

где T – температура, К; k_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности; k – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; k_t – турбулентная теплопроводность, рассчитывается при использовании турбулентной модели течения среды, Prg; $\vec{j}_j$ – диффузионный поток вещества j , 1/м²·с; S_h – внешний объемный источник энергии, Дж; e – внутренний источник энергии, Дж; $\bar{\tau}_{eff}$ – тензор сдвиговых напряжений; v – скорость движения среды, м/с; h – энтальпия, Дж/кг; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); h_j – теплосодержание, часть энтальпии, которая включает только изменения энтальпии за счет удельной теплоты; Y_j – массовая фракция вещества j ; T_{ref} – референтная (начальная) температу-

ра, °С; p – относительное давление, Па; p_{op} – статическое давление, Па; ρ – плотность среды, кг/м³; $\nabla \cdot k_{eff} \nabla T$ – соотношение определяет передачу энергии посредством кондуктивной теплопередачи; $-\nabla \cdot \sum_j h_j \vec{j}_j$ – соотношение определяет передачу энергии посредством диффузии; $\nabla \cdot \bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}$ – соотношение определяет передачу энергии посредством вязкого трения.

**Решение задачи с помощью программного комплекса
SolidWorks FlowSimulation**

Программный комплекс SolidWorks обладает возможностью проводить моделирование тепловых процессов с учетом кондуктивной, радиационной и конвективной теплопередачи. Исследуемый объект моделирования представлен на рис. 1.

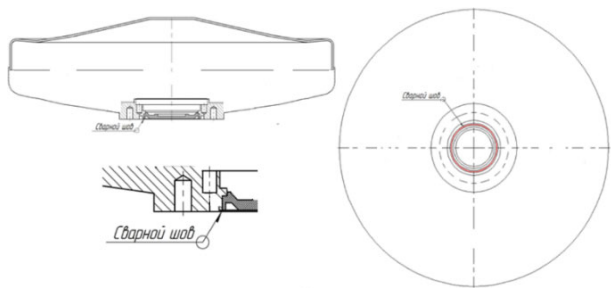


Рис. 1. Модель для исследования сварного шва

Сварка осуществляется в вакууме 10⁻² мм рт. ст. пучком диаметром 0,25 мм при температуре твердого тела 22 °С. Время сварки зависит от скорости движения пучка (таблица).

Время сварки в зависимости от скорости движения пучка

Скорость движения пучка, мм/с	Ориентировочное время сварки, с
15	64,1
25	38,5
35	27,5

Для имитации сварочного процесса в модель установки в месте сварки добавлены элементы 0,25×0,25 мм, соответствующие размерам реального пучка. Каждому элементу задавалась объемная мощность, включение элементов происходило последовательно, по часовой стрелке. Решалась нестационарная задача с шагом по времени 0,001 с.

Разработанная модель учитывает основные теплофизические свойства используемого материала (данная конструкция изготовлена из алюминиевого сплава 1370Т) с учетом фазового перехода в момент его плавления и испарения [3].

Результат теплового расчета электронно-лучевой сварки при энергии луча 420 Вт и скорости движения пучка 25 мм/с представлен на рис. 2.

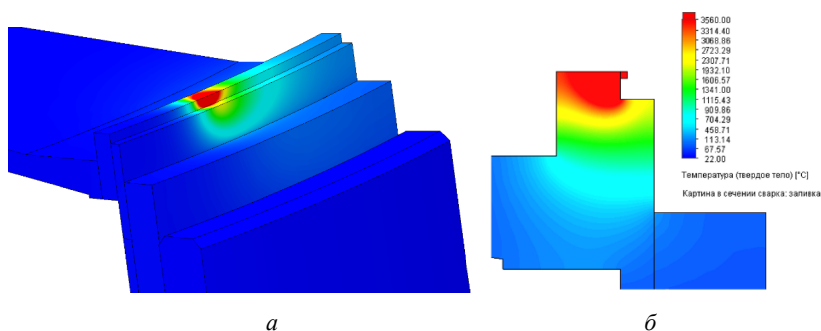


Рис. 2. Распределение температурного поля при энергии пучка 420 Вт: на поверхности детали (а); в разрезе (б)

Для подбора наиболее оптимального режима сварочного процесса проводился ряд расчетов с изменением скорости движения пучка и его мощности [4]. Далее оценивалось температурное поле для сравнения полученных расчетных температур с температурой плавления используемого металла с целью избежать непроваров (при температуре в месте шва меньшей температуры плавления материала) и прожогов/испарения металла (при температуре в месте шва, превышающей температуру плавления материала).

Решение задачи с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics

Для верификации полученных результатов проведено исследование в программном продукте Comsol Multiphysics методом конечных элементов с возможностью задания граничного условия, имитирующего движущийся пучок с гауссовым распределением мощности.

В результате расчетов получили нестационарное поле температуры по поверхности конструкции, показанное на рис. 3.

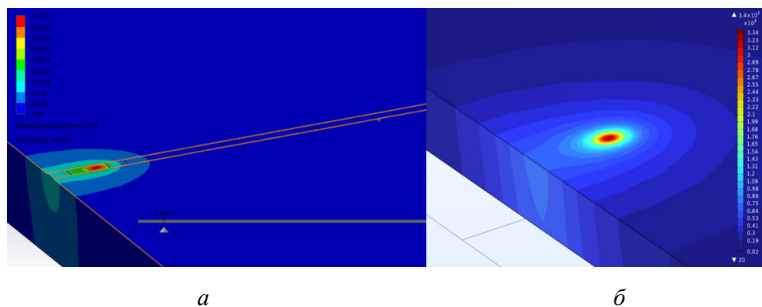


Рис. 3. Сравнение результатов: SolidWorks (а); Comsol Multiphysics (б)

Выводы

Проведен анализ имеющихся методик моделирования сварного соединения путем электронно-лучевой сварки и факторов, влияющих на его качество. По результатам анализа спроектирована математическая модель и разработана методика моделирования сварного процесса, позволяющая подбирать оптимальный режим. Предложенный метод последовательного включения сегментов позволил с вероятностью более 90 % определить требуемый режим сварочного процесса алюминиевого сплава 1370 Al-Mg-Si-Cu с экспериментально подтвержденным значением толщины стенки от 0,5, включая диаметр, скорость движения электронного луча и ускоряющее напряжение.

Результаты подтверждены моделированием в программном продукте Comsol Multiphysics, что показало высокую сходимость результатов (не менее 95 %), а также экспериментально: сварной шов, полученный при рекомендованных режимах, не содержит прожогов и обладает требуемой механической прочностью.

Данная методика используется для разработки технологических процессов электронно-лучевой сварки тонкостенных изделий из алюминиевых сплавов и может быть адаптирована для других видов свариваемых материалов и типов сварочного процесса.

Список использованных источников и литературы

1. Щербаков, А. В. Физико-математическая модель исследования процессов теплопередачи при электронно-лучевой сварке изделий произвольной формы / А. В. Щербаков, А. Л. Гончаров, М. А. Портнов // Сварочное производство. – 2011. – № 11. – С. 6–13.
2. Браверман, В. А. Частотный метод определения уровня фокусировки электронного луча и глубины проплавления при электронно-лучевой сварке /

В. А. Браверман, В. С. Белозерцев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – С. 65–68.

3. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.

4. Семичева, Л. Г. Моделирование процессов сварки / Л. Г. Семичева, С. С. Сахаров, С. Ю. Смирнов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки. – 2010. – № 5. – С. 180–181.

A. I. Osipenko , postgraduate

P. F. Baranov, CSc in engineering, director

E-mail: Osipenkoanastasiya7@gmail.com

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Modeling of Welding Processes Using the Control Volume Method

This article describes the study and modeling of the electron beam welding process according to the developed method in a mathematical package using the control volume method, which allows predicting the temperature distribution in the structure to be welded and selecting the most optimal mode based on the beam velocity, power, temperature and depth of weld penetration, eliminating deformation of structural elements.

Keywords: mathematical modeling, welding process, volume segments, surface segments, heat dissipation power, electron beam velocity.

УДК 538.958:537.226.1:544.2(045)

В. Вал. Соболев^a, д-р физ.-мат. наук, декан*Л. И. Жданова*^b, канд. физ.-мат. наук, доц.E-mail: ^aSoboleff.val@yandex.ru, ^blizlizhd@mail.ruИжевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Параметры сложной структуры оптических функций гексагонального и аморфного льда

В работе определены спектры шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций монокристаллов гексагонального и аморфного льда при 80 К в области 5–28 эВ, рассчитанных по экспериментальным спектрам отражения. Установлены основные особенности и общие закономерности оптических функций обеих модификаций льда. Расчеты выполнены с помощью компьютерных программ, созданных на основе соотношений Крамерса – Кронига, методов экстраполяции в неизмеренные области и известных аналитических формул связи между оптическими функциями. В разложенных спектрах $\epsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \epsilon^{-1}(E)$ усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда установлены 21 элементарная компонента для кристаллического гексагонального льда и 24 компоненты для аморфной фазы вместо 6–7 максимумов и ступенек исходных экспериментальных спектров. Определены основные параметры выделенных элементарных полос переходов (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i) обеих фаз льда. Предложена вероятная локализация выявленных элементарных полос переходов в зоне Бриллюэна.

Ключевые слова: гексагональный и аморфный лед, оптическая функция, междузонный переход, экситон, диэлектрическая проницаемость, соотношения Крамерса – Кронига, усовершенствованный метод объединенных диаграмм Арганда.

Введение

Изучение кристаллических и аморфных модификаций льда представляет как научный, так и практический интерес. Водяной лед в зависимости от температуры и давления кристаллизуется в одной из 17 модификаций. Существуют также термодинамически неустойчивые, аморфные и даже весьма необычные формы льда. Наиболее распространенной и устойчивой является кристаллическая гексагональная сингония ($P6_3/mmc$) I_h . В этой модификации каждая молекула воды окру-

жена четырьмя ближайшими к ней молекулами воды, размещенными в вершинах правильного тетраэдра на расстояниях 2,76 Å. В земной атмосфере вода может кристаллизироваться также и в кубической модификации I_c . Для получения остальных форм льда требуются высокие давления и низкие температуры, что можно реализовать в лабораторных условиях.

Важным свойством льда является многообразие внешних форм и свойств при одной и той же кристаллической сингонии. Так, по сравнению с модификацией I_h , лед XVII является метастабильной гексагональной формой со спиралевидными каналами. Эту форму можно использовать для хранения водорода, что весьма актуально в экологических технологиях. Научно-технический интерес представляет создание гибкого льда, одномерных упругих кристаллов гексагонального льда I_h [1]. Низкоразмерные кристаллы льда интересуют ученых как объекты необычной формы и для изучения свойств и кинетики кристаллизации.

Ширина запрещенной зоны кристаллического льда находится в интервале 7,5–10,0 эВ. Разрешенные оптические переходы рассматриваемых материалов расположены выше указанной области, поэтому их оптические спектры исследованы недостаточно. Свойства различных модификаций льда определяются особенностями их электронного строения. Поэтому актуальной является задача получения новой обширной количественной информации об оптических свойствах, параметрах полос переходов гексагонального и аморфного льда, непосредственно связанных с их электронным строением.

Методика расчетов

В большинстве случаев при почти нормальном падении света на образец в широкой области энергии экспериментально определяют только спектр отражения $R(E)$. Иногда, применяя довольно сложные методики, можно получить интегральную функцию потерь электронов $-\text{Im } \epsilon^{-1}$. Применяя эллипсометрические методы в области энергий менее 5,5 эВ, могут быть измерены спектры функций $\epsilon_1(E)$ и $\epsilon_2(E)$. Поэтому решение одной из фундаментальных проблем спектроскопии – расчет полного комплекса оптических функций – осуществляют на основе экспериментального спектра отражения, применяя специальные компьютерные программы, использующие интегральные соотношения Крамерса – Кронига, методы экстраполяции функции $R(E)$ в неизмеренные области и аналитические формулы, связывающие оптические функции между собой.

В широкой области энергий, как правило, полосы переходов твердых тел сильно перекрываются. Поэтому очень многие из них структурно не

наблюдаются на интегральной кривой переходов в спектрах функций $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$. Вторая фундаментальная задача спектроскопии представляет собой определение полного набора наиболее интенсивных переходов и их параметров (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i) различных материалов в широкой области энергии. Эта задача разложения интегральной кривой на элементарные компоненты математически считается некорректной и имеющей бесконечное количество решений с различными наборами параметров переходов. Однако ввиду принципиальной важности этой проблемы существует большое количество работ, посвященных ее решению методом воспроизведения спектров отражения или диэлектрической проницаемости, используя большое количество подгоночных параметров и различные возможные модели полос переходов [2]. Общеизвестно форму контура изолированной полосы выбирать в виде лоренциана с тремя параметрами: энергией максимума E_i , полушириной H_i и интенсивностью I_i . Для разложения спектров $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ на элементарные компоненты в данной работе нами был применен усовершенствованный беспараметрический метод объединенных диаграмм Арганда [2]. Этот метод позволил при декомпозиции указанных интегральных спектров на элементарные полосы с контуром лоренциана удалить лишние физического смысла «хвосты», занижающие интенсивность, и более корректно определить силы осцилляторов для поперечных полос. Используемые нами методики расчетов подробно изложены и многократно применялись [3–5].

Результаты расчетов и их обсуждение

В работе [6] измерены спектры отражения сколов монокристаллов гексагонального и аморфного льда при 80 К в области 5–28 эВ. На их основе нами определены спектры полных комплексов оптических функций обеих фаз льда (рис. 1). Экспериментальный спектр $R(E)$ гексагонального льда не зависит от поляризации $E_{||c}$ и $E_{\perp c}$ в пределах погрешности 0,03, то есть анизотропия льда чрезвычайно мала. Он состоит из интенсивного максимума № 1, слабого максимума № 2 и широкой полосы, содержащей два максимума № 4, 5 и три ступеньки № 6, 7, 9. Их аналоги наблюдаются в расчетных спектрах k , μ , $E^2\varepsilon_2$, ε_2 со смещениями в область больших энергий на $\sim 0,1$ – $0,6$ эВ и у n , ε_1 со смещениями в область меньших энергий на $\sim 0,03$ – $0,2$ эВ. Структуры функции характеристических потерь электронов $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$ смещены относительно структур ε_2 в область больших энергий на $\Delta E_{li} \approx 0,02$ – $0,5$ эВ. Полосы возбуждения объемных и поверхностных плазмонов очень широкие с максимумами при $E_{pv} \approx 21,3$ эВ, $E_{ps} = 20,0$ эВ соответственно.

Экспериментальный спектр отражения аморфного льда сохранил наивысшее значение $R \approx 0,06$ для обеих основных полос, но сложная тонкая структура в области $E > 10$ эВ сильно уширилась и почти не наблюдается. Поэтому структура спектров расчетных оптических функций также слабо выражена помимо двух основных максимумов № 1, 3. В работе [6] были также рассчитаны спектры ε_1 и ε_2 и спектр поглощения. Однако они оказались заметно заниженными и деформированными по сравнению с нашими данными. Детальный анализ показал, что это обусловлено, видимо, несовершенством программы расчетов работы [6].

В разложенных спектрах ε_2 и $-\text{Im}\varepsilon^{-1}$ установлена 21 компонента для гексагонального льда и 24 компоненты аморфной фазы (табл. 1, 2). Наиболее корректные значения энергий объемных плазмонов получились равными 21,3 эВ (гексагональная фаза) и 19,0 эВ (аморфная фаза). Меньшие значения E_{pr} аморфной фазы, в соответствии с общей теорией плазмонов, объясняются ее меньшей плотностью.

Характеристические потери электронов льда экспериментально измерены в работе [7] без указания типа фазы (кристаллическая или аморфная фаза). Интегральная кривая потерь содержит очень широкий максимум при ~ 20 эВ и ступеньку при $\sim 8,9$ эВ. Они близки по энергии к компонентам разложения потерь № 16 и № 3 (гексагональный лед), № 4 и № 17 (аморфный лед).

Согласно результатам разложений спектров ε_2 обеих фаз при переходе от кристалла к аморфному образцу количество компонент почти не изменилось, а энергии их аналогов различаются лишь на $\sim 0,05\text{--}0,2$ эВ. Однако по площади полос компонент различия находятся в интервале 1,4–6. В работе [8] с помощью синхротронного излучения изучены спектры поглощения кубического и аморфного льда в области 5–30 эВ. Эти экспериментальные данные хорошо согласуются с нашими расчетными результатами.

Спектры газообразной и жидкой воды настолько сильно отличаются от спектра льда, что их сопоставлять трудно. Но, с другой стороны, большие детальное сходства спектров гексагонального и аморфного льда свидетельствуют о слабом влиянии дальнего порядка на электронную структуру льда. Она определяется, по-видимому, ближним порядком кластера, содержащего небольшое количество формульных единиц H_2O . Теоретически этот вопрос не рассмотрен.

Известно несколько весьма упрощенных теоретических расчетов зон льда [9]. В работе [10] рассчитаны три валентные полосы и две зоны проводимости для трех направлений зоны Бриллюэна $\Delta - X$, $\Delta - Y$, $\Delta - L$ для кубического льда в приближении сильной связи с использованием молекулярных орбиталей. Расчетное значение $E_{gd} \approx 7,8$ эВ согласуется

с началом длинноволнового поглощения. На основе результатов [10] оценены энергии возможных интенсивных междзонных переходов в точках Δ , X , Y , L зоны Бриллюэна (вариант А в табл. 1). Вариант А допустим, если междзонные переходы начинаются с 7,8 эВ без участия экситонов. Однако экспериментально наименьшая величина E_{gd} не установлена, а возможные экситонные особенности не изучены даже в области длинноволнового края поглощения. Независимость самой длинноволновой полосы № 2 от наличия дальнего порядка позволяет предполагать, что она обусловлена экситонами малого радиуса. В этом случае $E_{gd} \sim 9,7$ эВ. Вариант В предполагаемой локализация междзонных переходов в зоне Бриллюэна предложен нами для объяснения природы компонент по данным теории [10].

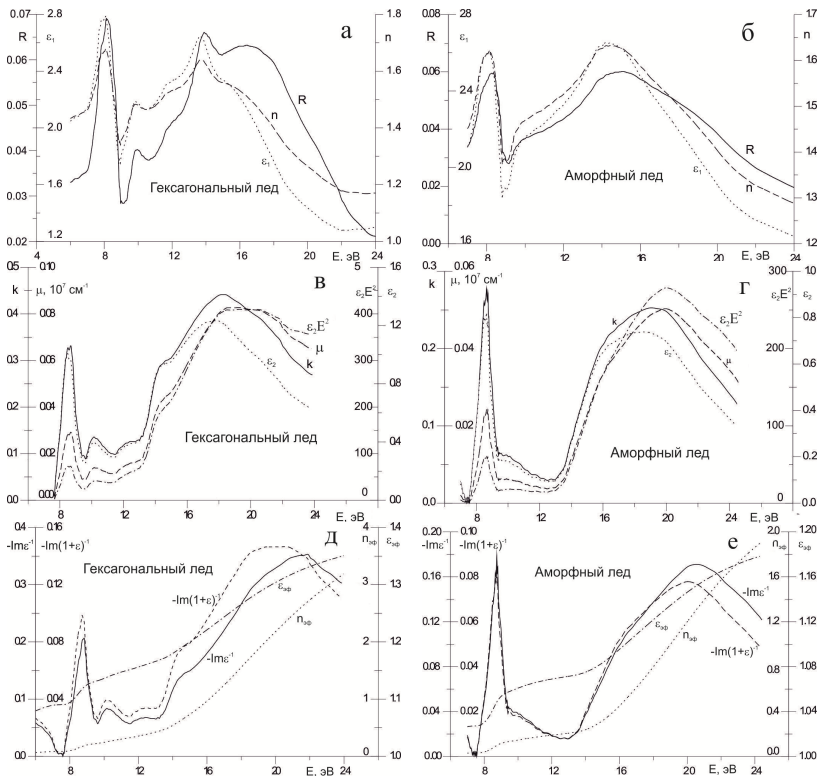


Рис. 1. Экспериментальные спектры отражения и расчетные спектры ε_1 , n , k , μ , $E^2\varepsilon_2$, ε_2 , $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$, $-\text{Im } (1+\varepsilon)^{-1}$, $n_{\text{эф}}$, $\varepsilon_{\text{эф}}$ гексагонального (а, в, д) и аморфного (б, г, е) льда

Таблица 1. Параметры разложения ϵ_2 и $-\text{Im } \epsilon^{-1}$ гексагонального льда, рассчитанных на основе спектра $R(E)$, а также теоретические энергии переходов E_i (эВ) и их локализация в зоне Бриллюэна для $E_g = 7,7$ (А) и 9,7 эВ (В)

№	E_i		H_i		S_i		E_i, k	
	ϵ_2	ϵ^{-1}	ϵ_2	ϵ^{-1}	ϵ_2	ϵ^{-1}	А	В
1	8,19	—	0,46	—	0,25	—	—	ЭКСИТОН
2	8,48	8,48	0,54	0,38	0,49	0,05	8,6; X	ЭКСИТОН
3	8,70	8,83	0,28	0,62	0,19	0,15	8,6; L	ЭКСИТОН
4	8,95	—	0,59	—	0,17	—	9,1; Y	ЭКСИТОН
5	9,84	—	0,34	—	0,05	—	9,7; Δ	9,7; Δ
6	10,14	10,20	0,57	1,20	0,16	0,12	10,1; L	—
7	10,53	—	0,57	—	0,15	—	10,5; Δ, L	10,6; X, L
8	11,00	—	0,45	—	0,09	—	11,2; Δ, L, Y	11,1; Y
9	12,10	12,20	1,00	1,20	0,29	0,09	12,1; Δ, L	12,0; Δ, L
10	14,20	14,30	1,60	1,20	1,33	0,17	14,0; L	14,3; Δ, L
11	16,20	15,70	2,80	1,50	3,38	0,24	15,8; L, Y	16,0; L
12	—	16,90	—	1,20	—	0,20	17,0; X	17,0; X, L
13	17,80	17,70	2,00	1,30	1,95	0,18	17,6; Y	17,7; L, Y
14	18,80	18,70	1,10	1,60	0,50	0,42	—	19,0; X
15	—	19,60	—	1,30	—	0,28	—	19,6; Y
16	19,90	20,70	2,20	1,50	1,91	0,46	—	—
17	21,50	21,90	2,10	1,40	1,38	0,47	—	—
18	23,00	22,90	2,20	1,20	1,26	0,29	—	—
19	—	24,10	—	1,60	—	0,51	—	—
20	24,50	24,90	1,30	0,70	0,69	0,09	—	—
21	25,50	25,50	0,80	0,90	0,42	0,28	—	—

Таблица 2. Параметры разложения ϵ_2 и $-\text{Im } \epsilon^{-1}$ аморфного льда, рассчитанных на основе спектра $R(E)$

№	E_i		H_i		S_i	
	ϵ_2	ϵ^{-1}	ϵ_2	ϵ^{-1}	ϵ_2	ϵ^{-1}
1	8,03	8,02	0,28	0,25	0,09	0,010
2	8,25	8,28	0,37	0,36	0,13	0,025
3	8,43	8,50	0,36	0,28	0,25	0,026
4	8,64	8,69	0,20	0,35	0,10	0,037
5	8,77	8,80	0,31	0,15	0,17	0,013
6	9,01	9,00	0,43	0,58	0,12	0,055
7	9,57	9,58	0,27	0,35	0,04	0,010
8	9,90	—	0,36	—	0,05	—
9	10,16	10,14	0,53	0,59	0,07	0,027
10	10,61	10,79	0,53	0,37	0,08	0,009

Окончание табл. 2

№	E_i		H_i		S_i	
	ε_2	ε^{-1}	ε_2	ε^{-1}	ε_2	ε^{-1}
11	—	11,21	—	0,38	—	0,009
12	14,50	14,80	0,67	1,50	0,21	0,054
13	15,14	—	0,84	—	0,25	—
14	15,80	15,60	1,30	1,50	0,68	0,096
15	16,80	16,90	1,40	1,80	0,84	0,200
16	17,60	17,90	0,90	1,30	0,39	0,090
17	18,70	19,00	1,90	1,70	1,47	0,230
18	—	19,70	—	1,10	—	0,080
19	20,10	20,70	1,60	1,60	1,02	0,240
20	21,60	21,60	1,90	1,20	1,01	0,120
21	—	22,50	—	1,40	—	0,180
22	22,90	23,50	1,40	1,10	0,48	0,110
23	24,20	24,40	1,50	1,40	0,52	0,170
24	—	25,10	—	0,50	—	0,040

Заключение

На основе экспериментального спектра отражения $R(E)$ впервые определены спектры шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций монокристаллов гексагонального и аморфного льда при 80 К в области энергии 5–28 эВ с установлением их основных особенностей и общих закономерностей. Беспараметрическим, усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда интегральные спектры $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ обеих фаз льда были разложены на простые компоненты. Вместо 7 максимумов и ступенек гексагонального льда, 6 максимумов и ступенек аморфной фазы исходных экспериментальных спектров, в разложенных спектрах ε_2 и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$ выявлены 21 элементарная полоса для гексагонального льда и 24 элементарных компоненты аморфной фазы с установлением их основных параметров (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i).

Наиболее корректные значения энергий объемных плазмонов получились равными 21,3 эВ (гексагональная фаза) и 19,0 эВ (аморфная фаза). Меньшие значения E_{pv} аморфной фазы, в соответствии с общей теорией плазмонов, объясняются ее меньшей плотностью.

Результаты разложения спектров ε_2 показывают, что при переходе от кристаллической фазы к аморфной число компонент полос переходов изменилось незначительно. Большие детальное сходства спектров гексагонального и аморфного льда свидетельствуют о слабом влиянии дальнего порядка на электронную структуру льда, которая, очевидно,

определяется ближним порядком кластера, содержащего небольшое количество формульных единиц H_2O .

На основе результатов работы [10] оценены энергии возможных интенсивных междозонных переходов в точках Δ , X , Y , L зоны Бриллюэна (вариант А в табл. 1). Также для объяснения природы компонент по данным теории [10] нами предложен вариант В вероятной локализации междозонных переходов. Полученная новая обширная информация позволит количественно и детально анализировать теоретические расчеты зон и экситонов кристаллической и аморфной фаз льда в широкой области энергии.

Список использованных источников и литературы

1. Elastic ice microfibers / P. Xu, B. Cui, Y. Bu, H. Wang, Y. R. Shen, L. Tong // Science. – 2021. – Vol. 373, no. 6551. – Pp. 187-192. DOI: 10.1126/science.abb3754.
2. Соболев, В. В. Оптические свойства и электронная структура неметаллов. II. Моделирование интегральных спектров элементарными полосами / В. В. Соболев. – Москва ; Ижевск : Ин-т комп. исслед., 2012. – 415 с.
3. Соболев, В. В. Оптические свойства и электронная структура неметаллов. I. Введение в теорию / В. В. Соболев. – Москва ; Ижевск : Ин-т комп. исслед., 2012. – 583 с.
4. Соболев, В. В. Оптические свойства силицида магния / В. В. Соболев, В. Вал. Соболев // Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. X Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 4–7 июля 2016 г.). – Санкт-Петербург : Изд-во Политех. ун-та, 2016. – С. 364.
5. Усовершенствованный метод разложения интегральных оптических спектров на элементарные компоненты с помощью диаграмм арганда / А. И. Калугин, Е. А. Антонов, Д. А. Перовщиков, В. Вал. Соболев // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 604–610.
6. Seki, M. Optical spectra of hexagonal ice / M. Seki, K. Kobayashi, J. Nakahara // Journal of The Physical Society of Japan. – 1981. – Vol. 50, no. 8. – Pp. 2643-2648. DOI: 10.1143/JPSJ.50.2643.
7. Otto, A. Characteristic electron energy losses of solid benzene and ice / A. Otto, M. J. Lynch // Australian Journal of Physics. – 1970. – Vol. 23, no. 4. – Pp. 609-612.
8. Watanabe, M. Vacuum ultraviolet absorption spectra of ice / M. Watanabe, H. Kitamura, Y. Nakai // Vacuum ultraviolet radiation physics. Proceedings of the IV International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (Hamburg, July 22-26, 1974). – Pergamon Press, Vieweg, 1974. – Pp. 70-72.
9. Соболев, В. В. Зоны и экситоны криокристаллов / В. В. Соболев. – Кишинев : Штиинца, 1986. – 206 с.
10. Parravicchini, G. P. Electronic states and optical properties in cubic ice / G. P. Parravicchini, L. Resca // Physical Review B. – 1973. – Vol. 8, no. 6. – Pp. 3009-3022. DOI: 10.1103/PhysRevB.8.3009.

V. Val. Sobolev^{✉ a}, DSc in phys. and math., dean
L. I. Zhdanova^{✉ b}, CS in phys. and math., assoc. prof.
E-mail: ^aSoboleff.val@yandex.ru, ^blizlizhd@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

Parameters of the Complex Structure of the Optical Functions of Hexagonal and Amorphous Ice

The paper defines the spectra of sixteen fundamental transversal and longitudinal optical functions of single crystals of hexagonal and amorphous ice at 80 K in the range of 5-28 eV, calculated from experimental reflection spectra. The main features and general patterns of optical functions of both ice modifications are established. The calculations were performed using computer programs based on the Kramers–Kronig relations, extrapolation methods to unmeasured regions, and well-known analytical formulas for the relationships between optical functions. In the decomposed spectra of $\varepsilon_2(E)$ and $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$, the improved method of combined Argand diagrams established 21 elementary components for crystalline hexagonal ice and 24 components for the amorphous phase instead of 6-7 maximums and steps of the initial experimental spectra. The main parameters of the selected elementary transition bands (energies E_i of the maximum and half-width H_i , area S_i and strength of the oscillator f_i) of both phases of ice are determined. A probable localization of the identified elementary transition bands in the Brillouin zone is proposed.

Keywords: hexagonal and amorphous ice, optical function, interband transition, exciton, dielectric constant, Kramers–Kronig relations, improved method of combined Argand diagrams.

Электронное научное издание

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2024.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 4–6 декабря 2024 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:
http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2024.pdf

Дата размещения на сайте: 10.07.2025

Технический редактор: *С. В. Звягинцова*
Корректор: *И. В. Ганеева*
Верстка: *Н. В. Паклиной*
Дизайн обложки: *К. Сабура*

Подписано к использованию 25.06.2025. Объем 19,8 МБ
Уч.-изд. л. 13,74. Заказ 121

Издательство управления информационных ресурсов
Ижевского государственного технического университета
имени М. Т. Калашникова. 426069, Ижевск, Студенческая, 7