


**«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2023.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ
И ПРОИЗВОДСТВА»**

Сборник материалов XIX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 29 ноября – 1 декабря 2023 года)



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

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В ХХІ ВЕКЕ – 2023.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ
И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов
XIX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 29 ноября – 1 декабря 2023 года)



Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2024

УДК 681.2(06)
П75

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, отв. редактор сборника;

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

А. П. Тюрин, зам. председателя, д-р техн. наук, проф., зам. начальника управления научно-исследовательских 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. А. 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;

А. И. Нистюк, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», 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;

И. А. Кайсина, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», председатель совета молодых ученых

П75 «Приборостроение в XXI веке – 2023. Интеграция науки, образования и производства» : сборник материалов XIX Всероссийской научно-технической конференции (Ижевск, 29 нояб. – 1 дек. 2023 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2024. – 327 с. – 16,8 МБ (PDF). – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7526-1050-9

В сборник включены избранные, прошедшие рецензирование статьи по материалам докладов XIX Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», проходившей с 29 ноября по 1 декабря 2023 года в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова. Рассматривается широкий круг научных и технических вопросов приборостроения. Издание предназначено для специалистов в области приборостроения, ученых, аспирантов, магистрантов и студентов.

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-1050-9

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2024
© Оформление. Издательство УИР ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова, 2024

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

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

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

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;

А. И. Нистюк, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», 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;

А. П. Тюрин, д-р техн. наук, проф., зам. нач. упр. науч.-исслед. работ, 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. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

Д. С. Васильев, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», 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;

И. А. Кайсина, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

И. М. Новоселов, 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;

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

Р. А. Хатбуллин, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

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

Г. Д. Бабошкин, доц. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. В. Блинова, мл. науч. сотр. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

А. Ф. Брестер, мл. науч. сотр. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

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

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

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

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

Содержание

Секция 1. Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение	
<i>Абашев К. Р., Глушков В. А.</i> Применение APM WinMachine для механического анализа конструкций РЭС.....	9
<i>Беляева С. Н., Глушков В. А.</i> Опыт применения САПР Delta Design для разработки печатных узлов.....	18
<i>Ветошкин П. А., Курзов Р. К., Шамсияхметов О. Я.</i> Применение системы гидродинамического и термодинамического экспресс-анализа KompasFlow для решения задач тепловыделения приборов.....	24
<i>Золотарь Я. О., Дмитриев Н. В.</i> Разработка и макетирование высокочастотного аттенюатора.....	33
<i>Клишин С. В., Пономарев И. С.</i> Исследование процесса распознавания колебаний в ненапыленном резонаторе твердотельного волнового гироскопа.....	41
<i>Князев И. В., Воронин Д. А., Ушаков П. А.</i> Разработка программы синтеза фрактального электрического импеданса на основе методов Фостера и Кауэра.....	48
<i>Кудрявцев А. А., Глушков В. А.</i> Разработка макета системы одноосной стабилизации наноспутника формата CubeSat.....	54
<i>Курзов Р. К., Ветошкин П. А., Шамсияхметов О. Я.</i> Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов на основе малогабаритного волнового твердотельного гироскопа.....	61
<i>Светлаков А. Л., Измestьев И. Д., Трутнев Г. А.</i> Особенности настройки измерительной компоненты твердотельного волнового гироскопа.....	69
Секция 2. Электротехнические системы и комплексы	
<i>Игнатовна А. О., Шангин А. С., Гречухина М. С., Ганигин С. Ю.</i> Использование реакционных материалов конструкции электродетонатора.....	76
<i>Санников П. А.</i> Идентификация электрических параметров гибридного шагового двигателя при различных режимах управления.....	81
<i>Фокеев А. Е., Бегишев И. А.</i> Подход к созданию цифрового двойника установки компенсации реактивной мощности.....	88
Секция 3. Физические методы и приборы измерений, контроля, диагностики	
<i>Абрамова Т. С., Шляхтенков С. П., Янин А. А.</i> Акустическая эмиссия при механических испытаниях пластиковых образцов, изготовленных методом послойного наплавления.....	95
<i>Белослудцев К. Ю.</i> Использование метода главных компонент для раздельного определения глубины и размера дефекта акустическим методом.....	102


<i>Блинова А. В., Денисов Л. А.</i> Выявление дефектов листов терморасширенного графита акустическим методом	107
<i>Богдан О. П., Загвоздкин П. В., Сидоров С. А.</i> Исследование коэффициента прохождения акустической волны сквозь лист пенополиэтилена	112
<i>Владыкин А. Л.</i> Оценка скорости объемных волн в образце из стали 17-4 PH, полученной методом аддитивной технологии	118
<i>Волкова Л. В., Кондаков А. А., Петров Д. А.</i> Оценка акустической анизотропии в технологическом цикле производства плашек буровых ключей.....	123
<i>Волкова Л. В., Макарова В. А., Егоров Р. Ю.</i> Оценка акустической анизотропии металлических труб и листов при использовании SH-волн и волн Лэмба	129
<i>Ворончихин С. Ю., Полянкин Г. А., Александров П. Э., Зорин М. С., Масленников А. С.</i> Устройство формирования последовательности заданного числа импульсов.....	134
<i>Лемонджавя В. Н., Касьянов А. Д.</i> Оценка применимости метода измерения уровня фибриногена по Клауссу в контроле оттаивания свежезамороженной донорской плазмы крови.....	140
<i>Муравьев В. В., Хомутов А. С., Степанова Е. А., Попова В. Д.</i> Оценка неравномерности остаточных напряжений в стенках цилиндра глубинно-штангового насоса с использованием метода акустоупругости	146
<i>Муравьева О. В., Колпаков К. В., Хозяйкин Г. С.</i> Влияние механических напряжений на акустоупругие эффекты для нормальных волн в стальном листе при цилиндрическом изгибе	151
<i>Муравьева О. В., Наговицын А. А.</i> О неравномерности акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя	156
<i>Муравьева О. В., Хомутов А. С., Торхов К. А., Владыкин А. Л., Белослудцев К. Ю., Наумов А. Д., Безносков А. А.</i> Методика оценки интегральной неравномерности толщины стенки цилиндра глубинно-штангового насоса акустическим методом	161
<i>Муравьева О. В., Шихарев П. А.</i> Оценка неравномерности акустических свойств по длине пружины автомобильной подвески	166
<i>Мурашов С. А., Волкова Л. В., Агеев М. А., Безносков А. А.</i> Особенности моделирования распространения упругих волн Лэмба в пластине под действием деформирующей статической нагрузки в среде COMSOL Multiphysics.....	170
<i>Салихов Х. М., Стоянов Н. Д., Молчанов С. С., Малинин Ю. Г., Буляков Б. Р., Шарифетдинов Д. И., Тазиров Л. Р., Салахов М. Х.</i> Разработка цифрового сенсора метана для применения в газомоторном автотранспорте.....	179
<i>Синцов М. А., Хомутов А. С., Пушин П. Н., Торхов К. А., Лукиных А. О.</i> Оценка параметров рэлеевских волн в технологическом цикле производства цилиндров глубинных штанговых насосов	186

<i>Стрижак В. А., Ашихмин Д. И.</i> Оценка временных затрат программно-го обеспечения при прозвучивании прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях	190
<i>Стрижак В. А., Пряхин А. В., Хасанов Р. Р., Пушин П. Н., Торхов К. А.</i> Особенности волноводного акустического контроля в технологическом цикле производства цилиндров и плунжеров глубинных штанговых насосов	197
<i>Цзи Линьюэ, Батрагин А. В.</i> Измерение площади поперечного сечения пористого материала методом рентгеновской томографии	204
<i>Шляхтенков С. П., Абрамова Т. С., Палагин С. В.</i> Оценка интенсивности развития контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов вихретоковым методом	211
Секция 4. Радиотехника, связь, информационные технологии	
<i>Арсланов И.А., Пляшаков Д. И., Булатова Е. Г., Богданов А. А.</i> Сравнительный анализ частотных характеристик электрических цепей, полученных экспериментально и с использованием стандартных пакетов прикладных программ	217
<i>Буддаков Д. В., Аль Аккад М. А.</i> Исследование применения методов машинного обучения для распознавания лиц	223
<i>Литвинов И. Д., Аль Аккад М. А.</i> Исследование практического применения субтитров в видео для людей с нарушением слуха	233
<i>Лысов А. А., Васильев Д. С.</i> Обзор существующих решений в области IVCAD-систем	240
<i>Пестерев Г. С., Загуляев И., Кортаева Е. В., Ахметзянов М. З., Зайцева Е. М.</i> Разработка и создание устройства для подсчёта количества отжиманий	243
<i>Пушкарева М. Н., Адуллин К. С.</i> Разработка программно-аппаратного блока управления аттенюаторами	248
<i>Чан Хью Нгхи</i> Исследование влияния скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на эффективность алгоритма распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах	255
<i>Чернов П. С.</i> Концепция работы интеллектуальных датчиков в распределенных информационно-измерительных и управляющих системах	261
<i>Шибанов Р. Э., Мерзлякова А. Д., Тунгускова А. М., Шаклеин М. А., Кайсина И. А.</i> Имитационное моделирование передачи видеоданных с борта БАС мультикоптерного типа по стандарту 802.11n	265
Секция 5. Физико-математические методы в приборостроении	
<i>Глазырин А. В., Майоров П. Ю</i> Адаптивный структурный анализ электрических сигналов с локальным нарушением закономерности	272

<i>Гусаров И. Е., Калугин А. И., Антонов Е. А.</i> Влияние параметров сканирующих систем на размеры лазерного пятна	279
<i>Козицын П. Р., Калюжный Д. Г.</i> Метод позиционирования лазера на основе резистивной плёнки с хромель-алюмелевым покрытием	284
<i>Кочурова Д. Н., Калугин А. И., Антонов Е. А.</i> Выбор начального приближения при моделировании распространения лазерного пучка	288
<i>Садовникова Я. Э., Офицерова А. В.</i> Оценка потерь в волоконно-оптической трассе с локальными дефектами на основе анализа заданной рефлектограммы	293
<i>Соболев В. Вал., Жданова Л. И.</i> Параметры сложной структуры оптических функций твердых CO_2 И CO	298
<i>Трефилов Д. А., Калюжный Д. Г.</i> Прибор для низкоинтенсивной лазерной терапии	309
<i>Шарафетдинов Д. И., Буляков Б. Р., Заитов М. Т. Р., Дулов Е. Н., Вороница Е. В.</i> Контроль процесса роста металлорганических кристаллов из раствора.....	314
<i>Юрков А. С., Селиванов И. А., Юрков В. Д., Высоцкая И. А., Плетнев М. А.</i> Выбор нагревательного элемента циркониевого сенсора остаточного кислорода.....	320

Секция 1. Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение

УДК 658.512.26

К. Р. Абашев, магистрант
В. А. Глушков , канд. техн. наук, доц.
E-mail: GL@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Применение APM WinMachine для механического анализа конструкций РЭС

Для автоматизированного проектирования и расчета механического оборудования активно применяется отечественный программный комплекс APM WinMachine. На примерах элементов конструкций электронных средств был показан процесс проектирования трехмерных моделей с последующими прочностными расчетами и топологической оптимизацией. Авторы использовали в процессе расчетов элементы электронной техники, процесс анализа которых недостаточно освещен в технической литературе и ограниченно представлен в информационном поле сети Интернет.

Ключевые слова: APM WinMachine, метод конечных элементов, статический анализ напряжений и перемещений, топологическая оптимизация, резонансные частоты, 3D-моделирование, элементы РЭС.

Введение

Определение прочностных характеристик конструктивных элементов электронных средств является одним из важнейших этапов в проектировании радиоэлектронной аппаратуры. Анализ механических характеристик позволяет понять, имеет ли конструкция изделия достаточную прочность для безотказной работы в заданных условиях эксплуатации.

В настоящее время широкое распространение в механическом анализе изделий получили компьютерные технологии. Цифровые инструменты значительно упростили многочасовые математические расчеты.

А вероятность появления ошибок проектирования сократилась ввиду скорости и визуального качества полученных результатов в ходе расчетов [1]. Однако специализированные программы для расчета механических характеристик, в том числе программа APM WinMachine, ориентированы лишь на машиностроительную и строительную области. А процесс анализа РЭС в этих программах недостаточно освещен в технической литературе и ограниченно представлен в информационном поле сети Интернет. В данной статье приведены примеры прочностных расчетов и топологической оптимизации конструкций электронной аппаратуры, которые могут быть проведены с помощью данной программы.

Постановка задачи и подход к ее решению

Большинство конструктивных элементов электронных средств в процессе эксплуатации так или иначе подвержены механическим воздействиям. Так, например, при работе радиоэлектронного устройства в элементах его конструкции может возникнуть резонанс, способный привести к разрушению аппаратуры. Кроме того, при неправильной транспортировке устройство также легко может быть повреждено вследствие ударных или вибрационных нагрузок.

В качестве примера проведем анализ прочностных характеристик автомобильной антенны и корпуса радиоэлектронного устройства. Топологическую оптимизацию выполним на примере кронштейна для сервопривода.

Первый расчет будем проводить в модуле геометрического моделирования с возможностью конечно-элементного (КЭ) анализа APM Studio, входящей в состав программного комплекса APM WinMachine [2].

После создания геометрии антенны выполним прочностный расчет, который включает в себя следующие шаги:

1. Задание материала.
2. Назначение закреплений.
3. Назначение нагрузки (сила, ускорение, давление и т. д.).
4. Генерация конечно-элементной сетки.
5. Выбор параметров расчета.
6. Расчет.
7. Представление результатов расчета.

Смоделируем ситуацию, когда автомобиль с установленной на него антенной движется с высокой скоростью. При этом со стороны воздуха на поверхность антенны будет оказываться давление. Приложим к антенне распределенную силу, равную 1 Н (рис. 1).

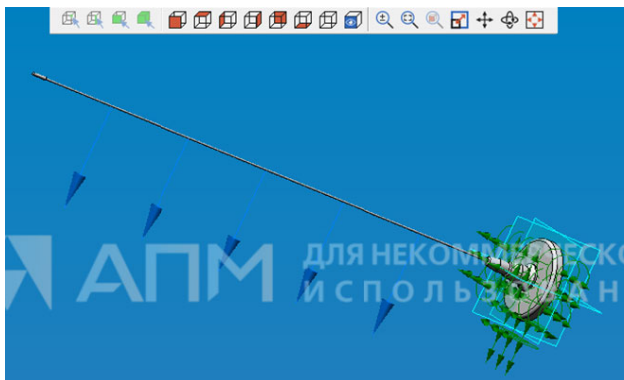


Рис. 1. Подготовка модели антенны к расчетам

На рисунке синими стрелками изображено направление силы, а зелеными – закрепление антенны относительно автомобиля.

После генерации сетки конечных элементов выполним линейный статический расчет.

В результате получаем карту распределения напряжений, из которой видно, что самым нагруженным местом антенны является нижняя часть антенного штывря и место соединения штывря с основанием (обозначены красным цветом) (рис. 2). Максимальное напряжение на данном участке составило 1025 Н/мм^2 .

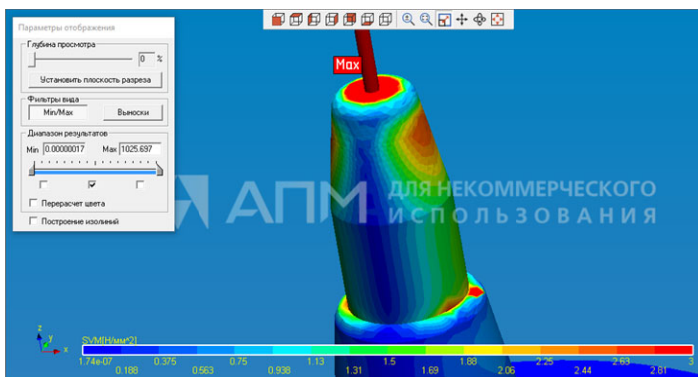


Рис. 2. Карта распределения напряжений

Оценим деформацию антенны. Для этого выведем карту распределения перемещений (рис. 3).

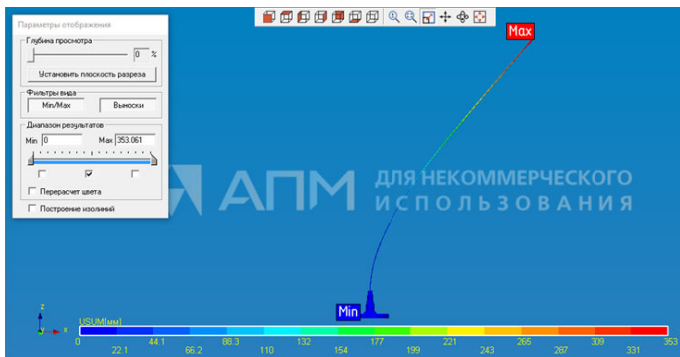


Рис. 3. Карта перемещений

По результатам можно увидеть, что наибольшее перемещение испытал наконечник антенного штыря (обозначен красным цветом). По цветовой шкале распределения перемещений видно, что конец антенны при заданных нагрузках отклонился от своего изначального положения на 35,3 см.

Исходя из результатов, можем сказать, что для обеспечения большей жесткости конструкции место соединения штыря антенны с основанием должно быть укреплено конструктивно.

Рассмотрим корпус радиоэлектронного устройства (рис. 4). Проведем для него расчет собственных частот колебаний в модуле проектирования и расчета конструкций методом конечных элементов APM Structure3D [3].

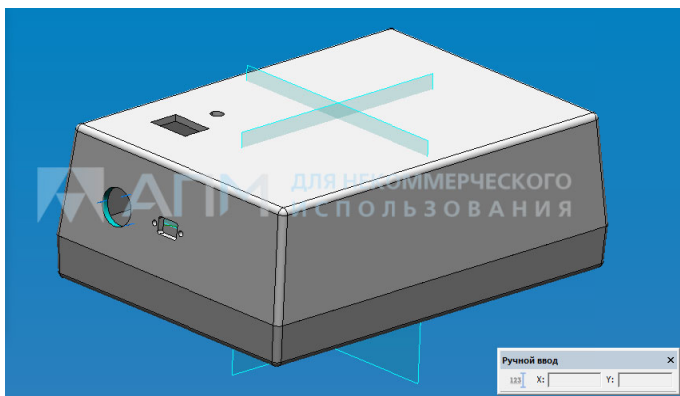


Рис. 4. Корпус РЭС

Подготовим модель к расчетам и проведем моделирование по заданному ранее алгоритму.

Получаем список частот, при которых в результате постоянных внешних частотных воздействий в корпусе может возникнуть резонанс (рис. 5).

N	Собственные частоты			Модальные массы (г.н.) и суммы модальных масс (с.н.н.) по направлениям ГСК							
	[рад/с]	[Гц]	[с]	н.н. X [%]	с.н.н. X [%]	н.н. Y [%]	с.н.н. Y [%]	н.н. Z [%]	с.н.н. Z [%]		
1	8669.59	1379.81	0.000724738	2.7e-06	2.7e-06	12.9	12.9	1.25e-05	1.25e-05		
2	12538.3	1995.53	0.000501119	4.08e-05	4.35e-05	0.00317	12.9	0.105	0.105		
3	20252.9	3223.34	0.000310237	1.11	1.11	0.0526	13	5.24e-05	0.105		
4	20438.3	3252.85	0.000307423	0.0663	1.18	1.72	14.7	0.00101	0.106		
5	23357.1	3717.39	0.000269006	0.031	1.21	0.00119	14.7	0.000822	0.107		
6	24536.8	3905.15	0.000256072	53.8	55	0.000328	14.7	0.0322	0.139		
7	27901	4440.59	0.000225195	0.0618	55.1	0.000395	14.7	14.8	14.9		
8	30420.2	4841.53	0.000206546	0.00249	55.1	0.863	15.5	0.0528	14.9		
9	32331.4	5145.7	0.000194337	0.00457	55.1	0.168	15.7	0.428	15.4		
10	32681.1	5201.36	0.000192258	0.119	55.2	0.00144	15.7	0.549	15.9		
11	33001.7	5252.39	0.000190309	0.0133	55.2	0.000458	15.7	7.61	23.5		
12	33680.1	5360.36	0.000186555	0.0106	55.2	0.00434	15.7	21.8	45.3		
13	34040.4	5417.69	0.00018458	2.55e-07	55.2	3.59	19.3	0.00606	45.3		
14	35595.8	5665.25	0.000176515	0.00376	55.2	0.000704	19.3	0.00109	45.3		
15	36900.4	5872.88	0.000170274	0.106	55.4	2.75e-07	19.3	8.82e-06	45.3		
16	39846.5	6341.77	0.000157685	0.000306	55.4	0.01	19.3	10.5	55.8		

Рис. 5. Частоты собственных колебаний корпуса РЭС

Выбрав в таблице одну из собственных частот, можем отобразить форму колебания конструкции при выбранной частоте. Выведем, к примеру, 6-ю форму собственных колебаний корпуса, которой соответствует частота 3905,15 Гц (рис. 6).

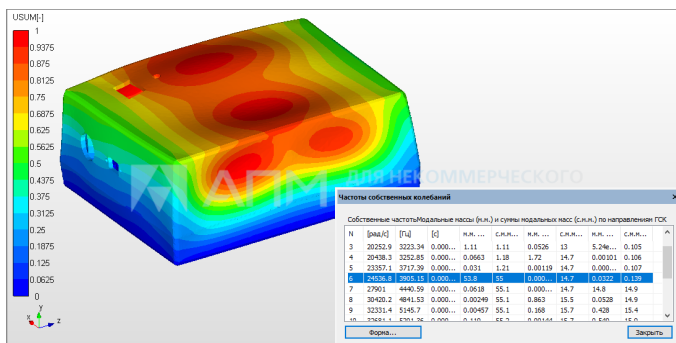


Рис. 6. Деформация корпуса на частоте 3905,15 Гц

Таким образом, наименьшая собственная частота приходится на 1379,81 Гц. Если частота внешних воздействий лежит в диапазоне 1–200 Гц, что соответствует автомобильным транспортным перевозкам,

то совпадение частот собственных колебаний корпуса с частотами внешних воздействий наблюдаться не будет, следовательно, не будет происходить явление резонанса.

Проведем топологическую оптимизацию кронштейна для сервопривода, который используется для создания конструкций роботов и манипуляторов (рис. 7).

В ходе оптимизации попробуем снизить материалоемкость и массу детали с сохранением заданных эксплуатационных показателей.

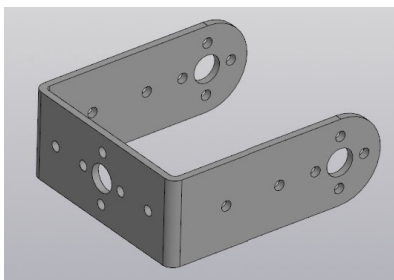


Рис. 7. Кронштейн для сервопривода

Подготовим модель к топологической оптимизации. Для этого припомним материал детали, зададим закрепление и назначим нагрузки, действующие на кронштейн в процессе эксплуатации.

После генерации конечно-элементной сетки составим оптимизационную задачу, в которой зададим условие уменьшения объема детали с сохранением максимальной жесткости.

Выполним расчет и получим результат в виде распределения объемных долей (рис. 8).

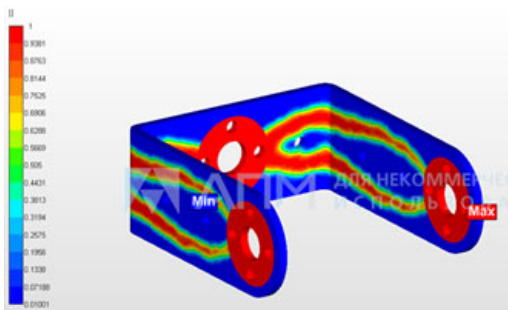


Рис. 8. Распределение объемных долей

Скроем часть материала, которая испытывает наименьшее напряжение (рис. 9).

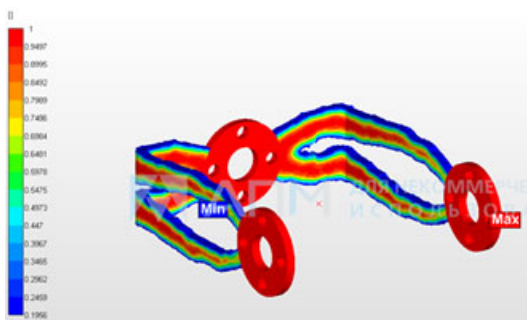


Рис. 9. Удаление материала с наименьшим напряжением

Проведем постобработку полученной топологии детали, в ходе которой сгладим все неровности и добавим скругления (рис. 10).

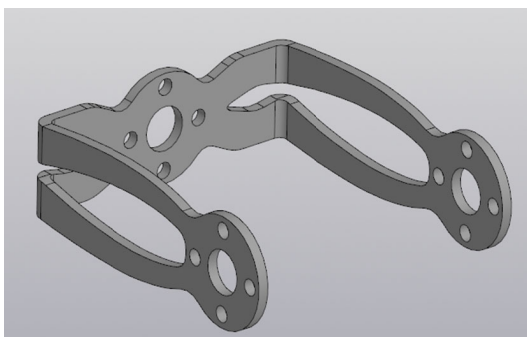


Рис. 10. Постобработка оптимизированной модели кронштейна

Оценим прочностные характеристики оптимизированной модели кронштейна и сравним ее с характеристиками исходной модели. Для этого выполним статический расчет деталей и получим следующие результаты, представленные на рис. 11.

По результатам можно заметить, что максимальное напряжение в модели после оптимизации составило $46,4 \text{ Н/мм}^2$. Напряжение в исходной модели, равное 44 Н/мм^2 отличается незначительно. Следовательно, жесткость полученной детали осталась неизменной, чего и требовалось добиться в ходе оптимизации.

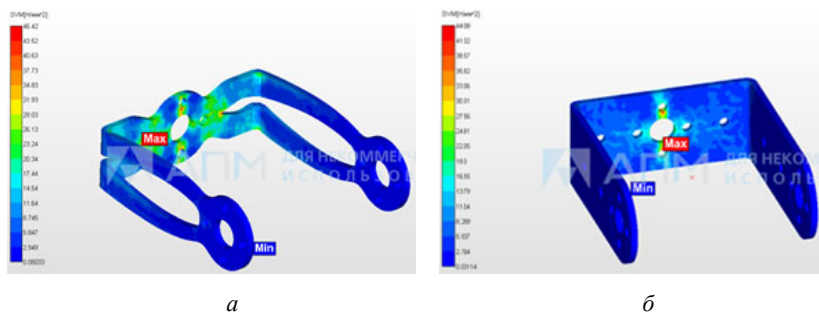


Рис. 11. Карты распределения напряжений оптимизированной (а) и исходной (б) модели кронштейна

Что касается массы оптимизированной детали, то она уменьшилась с 22 г до 11 г по сравнению с массой исходной детали.

Таким образом, в ходе оптимизации удалось снизить массу кронштейна в два раза, при этом сохранив его прочностные характеристики.

Выводы

Проведенные инженерные расчеты с использованием программного комплекса APM WinMachine, включающие в себя расчет прочностных характеристик конструкционных элементов электронных средств и топологическую оптимизацию, позволили убедиться в возможности применения данной программы в приборостроительной области.


Таким образом, для того чтобы избежать больших затрат времени и сил на длительные математические расчеты при определении прочностных характеристик конструкций РЭС, а также исключить появление ошибок проектирования электронного устройства на этапе разработки, конструктор радиоэлектронной аппаратуры может использовать в своей работе данную систему механического анализа.

Список использованных источников и литературы

1. Использование прочностных расчетов в конструировании РЭС с применением цифровых инструментов Компас-3D и APM FEM / К. Р. Абашев, С. Н. Беляева, А. Д. Михайлов, О. Я. Шамсияхметов // Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XVIII Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2022 г.). – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – 416 с. – URL: http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2022.pdf.

2. APM Studio. Руководство пользователя. Московская область, г. Королев, НТЦ «АПМ». – URL: <https://apm.ru/downloads/188/APM-Studio.pdf> (дата обращения: 26.03.2023).

3. APM Structure3D. Руководство пользователя. Московская область, г. Королев, НТЦ «АПМ». – URL: <https://apm.ru/downloads/188/APM-Structure3D.pdf> (дата обращения: 26.05.2023).

K. R. Abashev, master student
V. A. Glushkov , CSc in engineering, associate professor
E-mail: GL@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Application of APM WinMachine for Mechanical Analysis of REM Structures

Russian software APM WinMachine is actively used for automated design and calculation of mechanical structures. Examples of electronic devices structural elements are used to show the process of designing 3D models with subsequent strength calculations and topological optimization. The authors performed calculation of electronic equipment elements the analysis process of which is insufficiently represented in printed and Internet references.

Keywords: APM WinMachine, finite element method, static analysis of stresses and displacements, topological optimization, resonant frequencies, 3D modeling, REM elements.

УДК 004.896

С. Н. Беляева ^{✉ a}, магистрант
В. А. Глушков ^{✉ b}, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ^a kra_dept@istu.ru, ^b GL@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Опыт применения САПР Delta Design для разработки печатных узлов

В статье приводится пример проектирования печатного узла с использованием российской комплексной среды сквозного проектирования электронных устройств Delta Design 3.6. Рассмотрены этапы создания библиотеки компонентов с УГО и посадочными местами, построения электрической принципиальной схемы, компоновки и трассировки печатной платы.

Ключевые слова: Delta Design, библиотека компонентов, схема электрическая принципиальная, трассировка печатной платы, режим RightPCB, режим автотрассировки, конструкторская документация.

Введение

На сегодняшний день трудно представить работу инженера-конструктора радиоаппаратуры без использования систем автоматизированного проектирования (САПР). Системы проектирования печатных узлов позволяют автоматизировать рутинные задачи, ускорить процесс разработки радиоэлектронной аппаратуры, минимизировать количество ошибок и затраты на реализацию проекта. Одной из таких систем является отечественная разработка Delta Design от компании «ЭРЕМЕКС», которая еще не получила должного внимания на рынке САПР. Для многих пользователей, особенно крупных промышленных предприятий, переход на данный продукт с укоренившихся за долгие годы импортных аналогов является предметом серьезного неудобства, в том числе из-за необходимости освоения нового. Для того чтобы показать принципиальную возможность такого, в данной статье приведен поэтапный процесс разработки проекта многослойной печатной платы в Delta Design 3.6.

Конструкторское проектирование печатного узла

Система Delta Design позволяет инженеру-конструктору создавать и вести базу электронных компонентов (LiBerty), разрабатывать схемы

электрические (FlexyS), проектировать печатные платы как в ручном режиме RightPCB, так и с помощью автотрассировщика Topog. Данный САПР имеет модуль для реализации аналогового (SimOne) и цифрового (Simtera) моделирования. Помимо этого, в системе предусмотрен выпуск конструкторской документации на любом этапе проектирования, а также создание производственных файлов в модуле DeltaCAM [1–3]. Рассмотрим пример проектирования печатной платы устройства управления сигнала с антенны, процесс которого состоит из ряда этапов.

1-й этап разработки печатного узла: создание библиотеки компонентов

Основная концепция Delta Design – это целостность разрабатываемого проекта, которая проявляется в тесной интеграции всех составляющих: библиотека компонентов, схема, плата, правила, отчеты. Это позволяет сохранить данные в процессе проектирования электронного устройства. Библиотека компонентов, в свою очередь, также придерживается данной концепции и имеет разделение на три составляющие: условно-графическое обозначение (УГО), посадочное место и контактные площадки. При создании компонента можно воспользоваться готовой библиотекой семейств, где разработана большая часть УГО простых компонентов, например, резисторы, конденсаторы и т.д., в соответствии с ЕСКД, что позволяет ускорить процесс проектирования. Разработку УГО вручную необходимо выполнить только для более сложных компонентов, например, микросхем. На рис. 1 показано создание компонента – микроконтроллера K1986BE92QI. Остальные простые радиокомпоненты, такие как диоды, стабилитроны, резисторы и конденсаторы, при создании данного проекта были взяты из внутренней библиотеки Delta Design 3.6. Стоит отметить, что соединители можно откорректировать в соответствии с необходимым количеством выводов, также взяв за основу уже существующее УГО.

Посадочное место, представленное на рис. 1, было выполнено с помощью мастера создания посадочных мест, который является аналогом мастера в Altium Designer. Помимо этого, в Delta Design 3.6 есть возможность к одному УГО прикрепить несколько радиодеталей. Под радиодеталью понимается физическая реализация электронного компонента, который имеет свое посадочное место и набор параметров. Данная возможность ускоряет процесс создания библиотеки компонентов так же, как и доступность импорта библиотек компонентов из Altium Designer и PCAD.

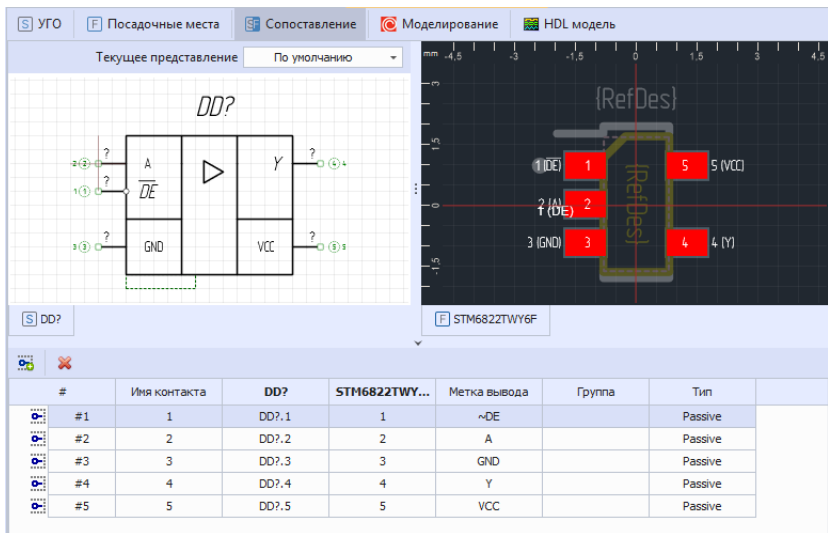


Рис. 1. Создание компонента в библиотеке Delta Design 3.6

2-й этап разработки печатного узла: создание схемы электрической принципиальной

При создании схемы (рис. 2) по ГОСТ 2.702–2011 [4] может использоваться как библиотека, созданная непосредственно пользователем в проекте, так и общая библиотека, созданная разработчиками. В целях автоматизации процесса и ускорения проектирования все штампы уже созданы. Помимо базовых форматов существует лист регистрации изменений, который необходим на производстве, и пользовательский, где можно создать свой вариант исполнения. Стоит отметить, что в данном САПР реализована возможность исполнения не только русскоязычного интерфейса с привязкой к ЕСКД, но и англоязычное исполнение со стандартом ANSI. Для создания схемы существуют все необходимые функции: размещение проводников (электрические соединения), шины, силовые и соединительные порты.

С помощью вкладки «Менеджер проекта» удобно ориентироваться в размещенных компонентах и цепях электрических соединений как на схеме, так и на плате. На основе схемы и данных, указанных при создании компонентов, уже можно создать перечень элементов, который реализуется в двух вариантах: таблица, где осуществляется корректирование данных, и привычные листы в соответствии с ГОСТ (рис. 3).

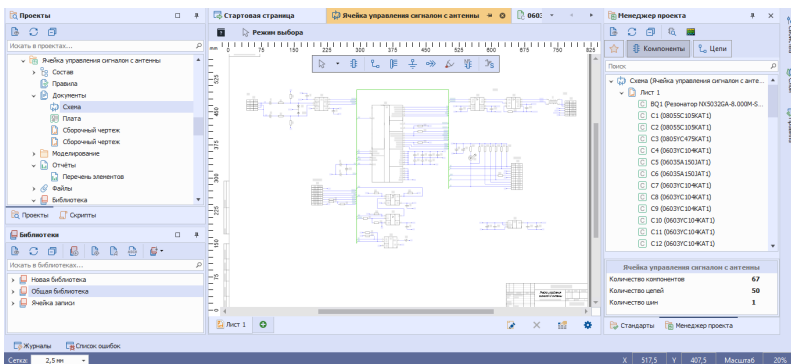


Рис. 2. Создание схемы электрической принципиальной

Тип обозначения	Наименование	Кол.	Примечание
BQ1	Резонатор NX5032GA-8.000M-STD-CSU-1 NDK	1	
	Конденсаторы AVX		
C1C2	0805SC10SKAT	2	
C3	0805YC475KAT	1	
C4	0603YC104KAT	1	
C5,C6	0603SA150JAT	2	
C7-C15	0603YC104KAT	9	
C16	0805SC104JAT	1	
C17	0603YC104KAT	1	
C18,C19	TAJ4106KO16RNJ	2	
C20	0603YC104KAT	1	
C21-C23	0805SC104JAT	3	
C24	TAJ4105PM16RNJ	1	

Рис. 3. Создание отчета: перечень элементов

Представленный на рис. 3 перечень элементов получен автоматически на основе размещенных компонентов на схеме, который выполнен в соответствии с ГОСТ 2.701–2008. Столбец «Наименование» по умолчанию заполняется согласно атрибуту «Радиодеталь», указанному в компоненте, при желании можно выбрать атрибут «Артикул», что будет более эффективным на производстве, или указать свой вариант.

3-й этап разработки печатного узла: создание печатного узла

При выполнении трассировки есть два режима: ручная трассировка RightPCB и встроенный автотрассировщик Totoro. Стоит отметить, что каждый режим оснащен большим выбором автоматических и ручных инструментов, которые обеспечивают разработку плат повышенной сложности. В САПР Delta Design 3.6 удобный интерфейс для задания правил трассировки и проверки правил выполнения с возможностью их исправления. В настоящем примере был использован автотрассировщик Totoro, с помощью которого разведены все простые цепи за исключением цепей питания, так как для них предусмотрены два отдельных слоя «3V3» и «GND». При выполнении автотрассировки применены правила: «Расчет формы проводников 45Angle», «С подталкиванием компонентов и переходов», «Перекладка проводников с возможным переносом на другой слой» и «Подвижка переходов». Для корректности выполнения автотрассировки по 4-му классу точности применено ограничение на ширину проводников, которая составит 0,3 мм, минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой 0,3 мм и минимальное расстояние между проводниками также 0,3 мм. После завершения работы программы был выбран наиболее удачный результат, где используется наименьшее количество переходов в цепях. Далее в режиме интерактивной трассировки были доработаны цепи питания и расположение некоторых сигнальных цепей. После чего был получен итоговый вариант многослойной печатной платы, представленный на рис. 4.

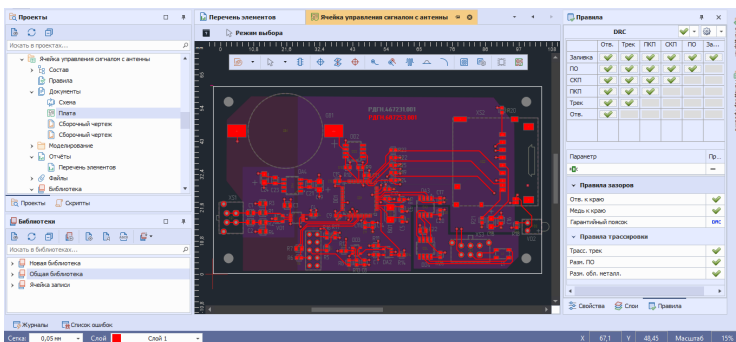


Рис. 4. Создание печатного узла

Трассировка выполнена с минимальным количеством переходных отверстий с оптимальным использованием доступного пространства на

плате. Все требования, предъявляемые ГОСТ 53429–2009 [5], соблюдены. В процессе интерактивной трассировки было внесено минимальное количество правок. Таким образом, результат трассировки в Delta Design 3.6 подтверждает высокое качество проектирования платы и гарантирует ее надежную работу в рамках заданных требований.

Выводы

Рассмотренный пример показывает, что простой и понятный интерфейс на русском языке позволит специалисту быстро перейти на данную систему, так как многими функциями можно воспользоваться интуитивно. Функционал САПР Delta Design 3.6 для проектирования радиоэлектронной аппаратуры ускоряет процесс ее разработки. Это особенно важно в условиях импортозамещения САПР электроники и усиления технологического суверенитета страны.

Список использованных источников и литературы

1. Delta Design. Уроки. Начало работы. – URL: <https://www.aremex.ru/knowledge-base/delta-design/lessons/nachalo-raboty/> (дата обращения: 13.10.2024).
2. Delta Design. Форум. – URL: <https://www.aremex.ru/society/forum/> (дата обращения: 13.10.2024).
3. Delta Design. Статьи. – URL: <https://www.aremex.ru/knowledge-base/delta-design/articles/> (дата обращения: 13.10.2024).
4. ГОСТ 2.702–2011. Правила выполнения электрических схем. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.
5. ГОСТ 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 11 с.

S. N. Belyaeva ^{✉ a}, master student

V. A. Glushkov ^{✉ b}, CSc in engineering, associate professor

E-mail: ^akra_dept@istu.ru, ^bGL@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Experience in Printed Circuit Board Assembly Design Using Delta Design Software

The paper gives an example of designing a printed circuit board assembly using the Russian end-to-end electronics design software Delta Design 3.6. There considered stages of electronic component graphical symbols and footprints creation, electrical circuit diagram building, PCB layout and routing.

Keywords: Delta Design, component library, electrical circuit diagram, PCB routing, RightPCB mode, auto-routing mode, engineering documents.

УДК 536.242

*П. А. Ветошкин*¹, студент

*Р. К. Курзов*¹, студент

О. Я. Шамсияхметов^{1,2}✉, ст. преподаватель

E-mail: kra_dept@istu.ru

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

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Применение системы гидродинамического и термодинамического экспресс-анализа KompasFlow для решения задач тепловыделения приборов

Система KompasFlow позволяет проводить экспресс-анализ движения потоков жидкостей и газов внутри конструкций, создаваемых в КОМПАС-3D. Данная система не нашла широкого применения в области приборостроения и используется в основном в машиностроении и строительстве, а процесс моделирования работы системы недостаточно освещен в научной литературе и сети Интернет. На основе простого примера авторы показали процесс анализа тепловыделения внутри корпуса прибора, используя программные средства среды KompasFlow.

Ключевые слова: КОМПАС-3D, KompasFlow, тепловой анализ, тепловыделение.

Введение

На сегодняшний день большое распространение получили программы и комплексы, заточенные под задачи разработки и конструирования различных приборов: начиная с создания чертежа и заканчивая полноценной 3D-моделью готового устройства. Но не всегда готовая модель может соответствовать заявленным характеристикам, одной из которых является тепловыделение – важный параметр в каждом приборе.

Система гидродинамического и термодинамического экспресс-анализа KompasFlow [1] в основном используется в машиностроении и строительстве, о чем говорит большое количество методического и практического материала. В области же приборостроения очень сложно найти подробные инструкции и методические пособия, заточенные конкретно под анализ процессов в электронных приборах. В данной

статье приведены примеры анализа эффективности охлаждения готового устройства с применением данной системы.

Постановка задачи и подход к ее решению

Большинство электронных приборов содержат в себе элементы, обладающие высоким тепловыделением. Как правило, для охлаждения таких элементов применяются радиаторы, позволяющие отводить тепло от нагреваемой поверхности. Однако не всегда установленного радиатора бывает достаточно, чтобы эффективно охлаждать компонент. В таком случае либо увеличивают площадь самого радиатора, либо дополнительно устанавливаются вентиляторы, способствующие быстрому отводу тепла [3].

Исследование будет проводиться на примере типового корпуса стационарного персонального компьютера (далее ПК). Рассмотрено четыре конфигурации ПК, в которых будет меняться единственный параметр – количество вентиляторов, участвующих в работе:

1. Работа одного вентилятора, закрепленного на радиаторе центрального процессора (ЦП), передняя, задняя и верхняя панели работают на сводный вход и выход воздуха.

2. Работа на вдув передней панели.

3. Работа на выдув задней панели вместе с работой передней на вдув.

4. Работа передней панели на вдув, задней и верхней – на выдув.

Во всех выше перечисленных вариантах будут использоваться корпусные вентиляторы, соответствующие ГОСТ 34002–2016 (ISO 13349:2010) [2]:

1. На передней и верхней стенках используются вентиляторы LIAN LI UNI FAN SL V2 140 [G99.14SLV21W.R0]:

– максимальная скорость вращения – 1600 об/мин;

– воздушный поток на максимальной скорости – 77,6 CFM (кубических футов в минуту);

– максимальное статическое давление – 20,5 Па.

2. На задней панели и на радиаторе ЦП используются вентиляторы LIAN LI UNI FAN SL V2 120 [G99.12SLV21W.R0]:

– максимальная скорость вращения – 2000 об/мин;

– воздушный поток на максимальной скорости – 64,5 CFM (кубических футов в минуту);

– максимальное статическое давление – 25,4 Па.

При проведении анализа будет сравниваться воздушный поток вентиляторов при максимальных оборотах, моделируя ситуацию, когда ЦП выделяет максимальный тепловой поток при своей работе. Тепловыде-

ление остальных компонентов будет оставаться постоянным на протяжении всех опытов.

При проведении экспериментов необходимо внести исходные данные в программу расчета:

1. Глобальные параметры:

- опорное давление – 101 кПа;
- Опорная температура – 273 °К.

2. Вещество – воздух:

- молярная масса – 0,029 кг/моль;

- вязкость – $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$;

- теплопроводность – 0,026 Вт/(м·К);

- удельная теплоемкость – 1005 Дж/(кг·К).

3. Физические процессы:

- уравнение движения (Навье – Стокса);

- уравнение теплопереноса (энергии).

4. Тепловыделение поверхности ЦП – 170 Вт.

5. Тепловыделение графической карты – 150 Вт.

В качестве материала стенок корпуса выступает сталь марки 10ХСНД в соответствии с ГОСТ 19281–2014, коэффициент теплопроводности – 46,5 Вт/(м·К).

На первом опыте, где будет работать только вентилятор, установленный на куллер процессора, получается следующая картина (рис. 1).

На рисунке стрелками показано направление движения воздуха в корпусе, а цвет стрелок показывает температуру этого воздуха. Как можно увидеть, воздух внутри корпуса не имеет четкой направленности, что не позволяет радиатору и процессору охлаждаться в полной мере.

При анализе графика средней температуры ЦП (рис. 2) можно увидеть, что значения температуры колеблются на уровне 100 К. Такие температуры могут привести к быстрому выходу из строя ЦП, так как временами график показывает скачки до уровня 110 К и выше, а это недопустимо.

Результаты следующего опыта (рис. 3).

Можно увидеть, что области нагрева с критическими температурами уменьшились. Это можно объяснить, так как при включении вентиляторов на передней панели объем продуваемого воздуха увеличился и стал направленным. Это положительным образом сказалось на охлаждении компонента, и средняя температура упала до уровня 95 К при выходе на стационарное состояние (рис. 4).

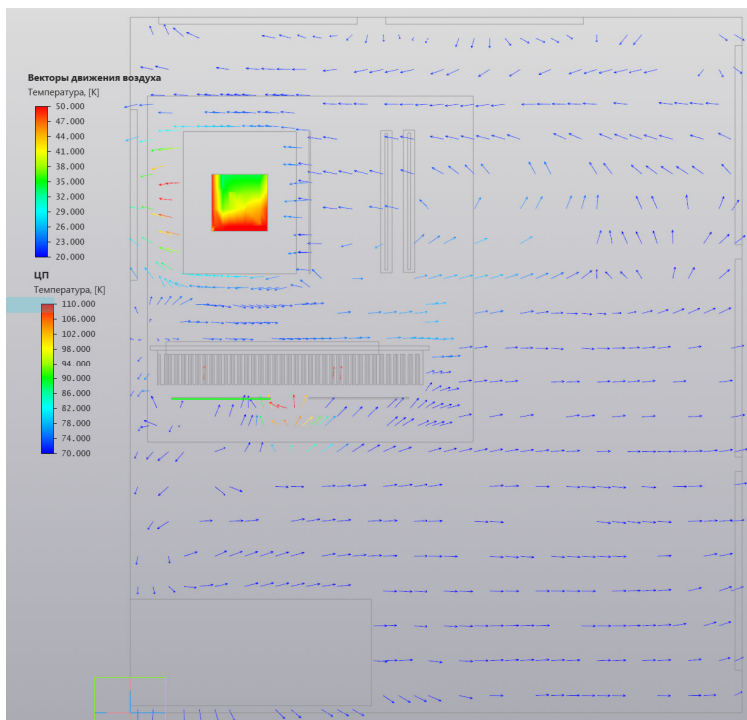


Рис. 1. Анализ потоков и температур воздуха в корпусе ПК со свободным входом/выходом воздуха через стенки корпуса

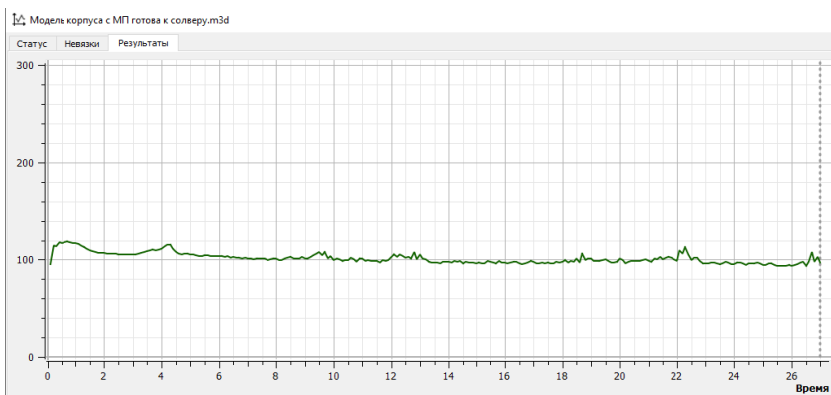


Рис. 2. График изменения средней температуры ЦП

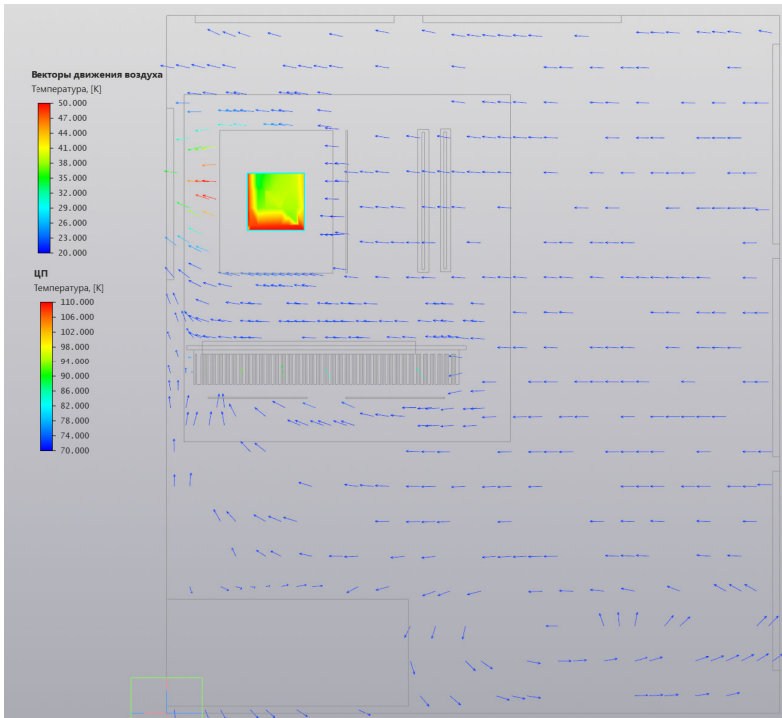


Рис. 3. Поток воздуха при включенных вентиляторах передней панели

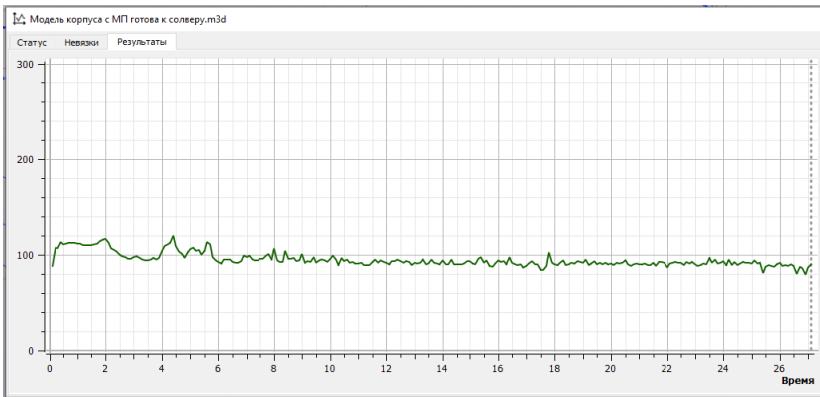


Рис. 4. График изменения средней температуры ЦП

Результаты третьего измерения (рис. 5).

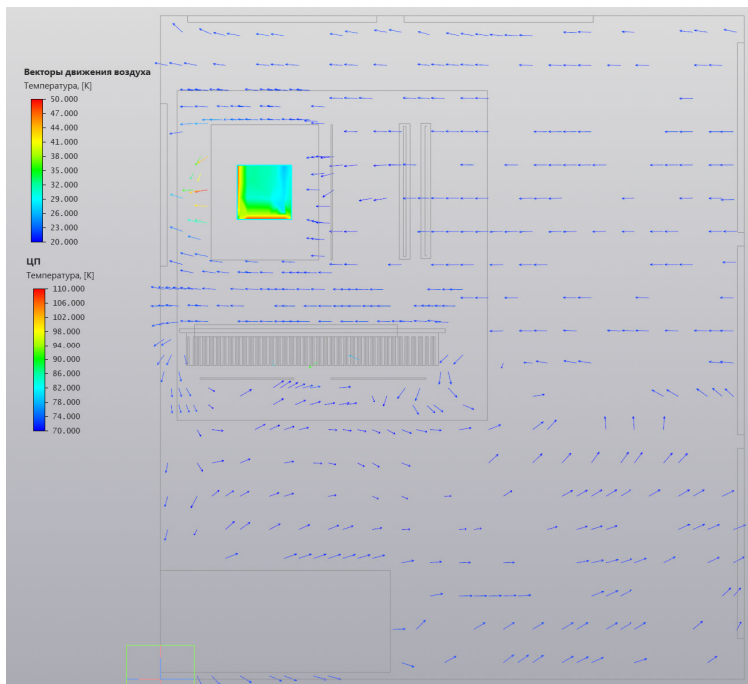


Рис. 5. Потоки воздуха при дополнительно включенном вентиляторе на задней панели

В данном случае наблюдается дальнейшее уменьшение области высоких температур, что снова можно объяснить увеличением объема воздуха, проходящего через радиатор ЦП. Средняя температура при этом снизилась и составила 88 К (рис. 6).

На последнем эксперименте, где включим уже все вентиляторы на стенках: передняя стенка – на вдув, задняя и верхняя – на выдув воздуха, видна следующая картина (рис. 7).

Теперь можно увидеть несколько другую картину: области критических температур почти не изменились. Объяснить это можно тем, что часть воздуха просто не успевает доходить до радиатора ЦП, сразу выдуваясь за пределы корпуса ПК. График на рис. 8 позволяет понять, что средние температуры почти не изменились и составили 86–87 К.

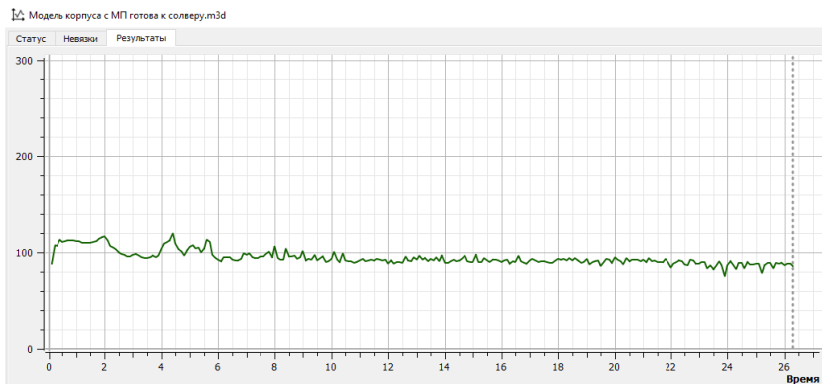


Рис. 6. График изменения средней температуры ЦП

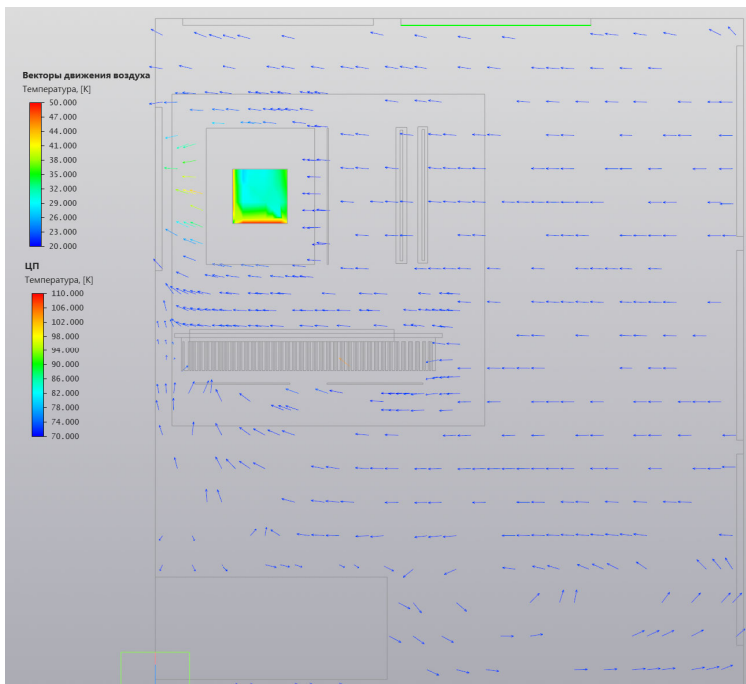


Рис. 7. Анализ потоков и температур воздуха при всех работающих вентиляторах

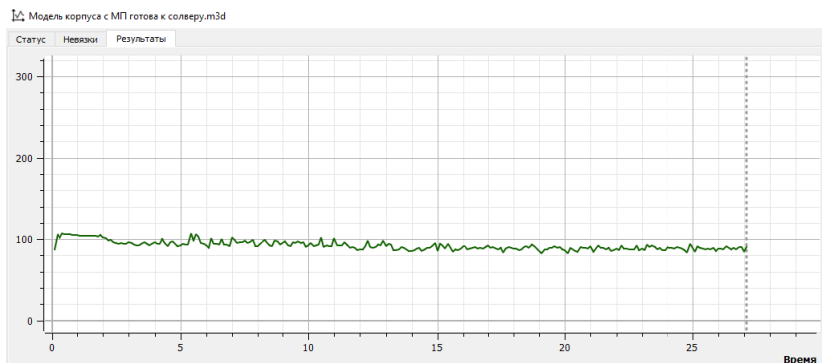


Рис. 8. График изменения средней температуры ЦП

По итогам всех экспериментов была составлена таблица зависимости количества работающих вентиляторов и средней температуры ЦП (таблица).

Зависимость температуры

Номер опыта	Количество работающих вентиляторов, шт.	Средняя температура ЦП, К
1	1	100
2	4	95
3	5	88
4	7	86

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что конкретно для данного примера оптимальным будет работа вентиляторов на передней и задней стенках. Дальнейшее увеличение их количества на верхней стенке не даст ощутимого уменьшения средних температур, но выльется в дополнительное потребление и шум всей системы в целом.

Выводы

Проведенные опыты с использованием системы экспресс-анализа KomrasFlow позволили добиться наилучшего охлаждения заданных компонентов устройства и выбрать оптимальный вариант установки охлаждающих элементов.

Модель корпуса, использованная при анализе, являлась лишь примером, позволяющим получить результаты, приближенные к реальным показателям. Безусловно, данную систему можно применять и на более точные и сложные модели, дабы получить результаты, близкие к реальным.

Список использованных источников и литературы

1. KompasFlow. Версия для КОМПАС-3D v22 Учебная версия // Руководство пользователя. – URL: https://kompas.ru/source/info_materials/2018/Kompas-Flow-Help.pdf (дата обращения: 10.08.2023).
2. ГОСТ 34002–2016 (ISO 13349:2010). Вентиляторы. Термины и классификация – Москва : Стандартиформ, 2017. – 38 с.
3. Буткевич, Г. В. Электрические аппараты / Г. В. Буткевич, В. Г. Дегтярев, А. Т. Сливинская – Москва : Высш. шк., 1977. – 200 с.

*P. A. Vetoshkin*¹, student

*R. K. Kurzov*¹, student

O. Ya. Shamsiakhmetov^{1,2}✉, senior lecturer

E-mail: kra_dept@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Application of the Hydrodynamic and Thermodynamic Rapid Analysis System KompasFlow for Solving Problems of Heat Dissipation of Devices

The KompasFlow system allows for an express analysis of the flow of liquids and gases inside structures created in KOMPASS-3D. This system has not found wide application in the field of industrial engineering and is used mainly in mechanical engineering and construction, and the process of modeling the operation of the system is insufficiently covered in scientific literature and the Internet. Based on a simple example, the authors showed the process of analyzing heat release inside the device body using the software tools of the KompasFlow environment.

Keywords: COMPASS-3D, KompasFlow, thermal analysis, heat release.

УДК 621.372.44

Я. О. Золотарь, магистрант

Н. В. Дмитриев, магистрант

E-mail: 550310571@mail.ru

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

Разработка и макетирование высокочастотного аттенюатора

Описан порядок проектирования конструкции мощного аттенюатора в условиях ограниченных габаритных параметров. Представлены расчеты и результаты моделирования в САПР, а также рассмотрен процесс разработки оснастки для проверки аттенюатора.

Ключевые слова: аттенюатор, резистивный элемент, тепловой расчет, плечной резистор.

Введение

подавляющее большинство мощных аттенюаторов имеют большие габаритные размеры, стороны платы такого устройства могут измеряться десятками миллиметров, к чему также прибавляется вдвое больший радиатор. Если при использовании вне приборов, как переход между кабелями, эти параметры могут быть удовлетворительными, то при использовании внутри корпуса такие габариты неприемлемы. Размеры покупных китайских аттенюаторов, которые являются копиями американских, в лучшем случае достигают размеров 15×25 мм для затухания 30 дБ для 20 Вт мощности. Наша задача состоит в разработке аттенюатора, который будет иметь те же характеристики, но меньшие размеры.

Разработка

Важной составляющей любой реализации аттенюатора является использование тонких пленок [1]. Сложность миниатюризации состоит в том, чтобы добиться малого теплового сопротивления.

Хорошим вариантом будет использование ступенчатой топологии, что позволит максимально эффективно использовать площадь платы.

Для реализации ступенчатой топологии необходимо рассеять одинаковую или примерно одинаковую мощность на каждом каскаде. Тогда

первый аттенуатор должен быть рассчитан на минимальное ослабление, а последний – на максимальное.

Для вычисления нам понадобится минимальное и максимальное расчетное затухание для каждого звена, которое зависит от отклонения сопротивления пленки, в нашем случае возьмем 20 %. Представим П-образный аттенуатор как делитель напряжения, в котором импеданс генератора (50 Ом) также представляет собой составную часть делителя.

Пусть Z_0 – импеданс генератора, R_2 – сопротивление двух заземляющих резисторов, а R_1 – проходной резистор. Тогда первая часть делителя представляет собой параллельное сопротивление R_p генератора и первого R_2 , при помощи которого можно найти общее сопротивление Z_L .

$$R_p = \frac{Z_0 R_2}{Z_0 + R_2}; \quad Z_L = \frac{R_2 (R_p + R_1)}{R_2 + R_p + R_1}. \quad (1)$$

Если представить, что на вход подается любая мощность P_{in} , то затухание можно посчитать по формуле, подставив выходную мощность P_{out} :

$$D = 10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (2)$$

Используя эти данные, можно найти затухание для аттенуатора с нестандартно подобранными сопротивлениями [2].

$$D = 10 \lg 4 \left(\left(1 - \frac{Z_0}{R_2 \left(\frac{Z_0 R_2}{Z_0 + R_2} + R_1 \right)} \right) \left(\frac{\frac{Z_0 R_2}{Z_0 + R_2}}{\frac{Z_0 R_2}{Z_0 + R_2} + R_1} \right) \right)^2. \quad (3)$$

Эта формула позволит рассчитывать нестандартные аттенуаторы на требуемое затухание. А также именно по этой формуле следует рассчи-

тывать минимальное и максимальное возможные затухания для каждого звена аттенюатора.

Чтобы коэффициент стоячей волны (КСВ) был наиболее близок к единице, необходимо, чтобы Z_L был как можно более близким к Z_0 [3], и расчетная формула принимает вид:

$$\text{КСВ} = \frac{\left(1 + \frac{|z_0 - z_L|}{|z_0 + z_L|}\right)}{\left(1 - \frac{|z_0 - z_L|}{|z_0 + z_L|}\right)}. \quad (4)$$

Тем самым можно составить многозвенный аттенюатор. При этом его затухание будет равно сумме затуханий каждого звена. Общее КСВ не должно превысить 1,5.

Геометрические размеры пленочных резисторов необходимо подобрать так, чтобы коэффициент формы [4] соответствовал требуемому сопротивлению. Но при этом необходимо учитывать, что при уменьшении площади увеличивается собственный нагрев элемента.

Для нахождения нагрева резистивных элементов представим их в виде сосредоточенных источников тепла [5], для чего рассчитаем тепловое сопротивление R_{nc} элемента, при этом будет учитываться в том числе и площадь S резистора, ширина зоны теплового влияния d , удельное тепловое сопротивление r_1 и коэффициент теплопроводности λ_n .

$$R_{nc} = \frac{d}{\lambda_n \sqrt{S} (\sqrt{S} + 2d)} + \frac{h_n - d + r_1 \lambda_n}{\lambda_n (\sqrt{S} + 2d)^2}. \quad (5)$$

Собственный перегрев для каждого резистора будет приближенно равен тепловому сопротивлению для R_1 отдельного звена, умноженному на мощность рассеяния всего этого звена.

Расчетные параметры для шестикаскадного аттенюатора представлены в табл. 1, его топология на рис. 1, результаты электромагнитной симуляции в диапазоне от 0 до 2,5 ГГц на рис. 2.

Расчетные параметры в табл. 1 совпадают с параметрами, полученными при моделировании (в том числе и КСВ – красный график, так как общее КСВ равняется 1,13, и 30 децибел затухания – синий график). При этом размеры аттенюатора составили 15,5×8 мм, и при комнатной температуре его нагрев составит 85 °С.

Таблица 1. Параметры звеньев аттенюатора

Номер звена	1	2	3	4	5	6
Длина R_1 , мм	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,85
Ширина R_1 , мм	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
R_1 , Ом/квадрат	50	50	50	50	50	500
Длина R_2 , мм	2,5	1,5	1,15	0,9	0,75	1,1
Ширина R_2 , мм	1	1	1	1,15	1,5	1,7
R_2 , Ом/квадрат	500	500	500	500	500	50
D , дБ	-1,03	-1,26	-1,45	-1,81	-2,34	-22,20
КСВ	1,07	1,004	1,03	1,09	1,18	1,45
P , Вт	5,02	4,95	4,38	3,96	3,40	4,51
P_{\max} , Вт	3,99	4,11	4,26	4,44	4,66	4,65
T_c , °C	53,27	50,12	42,12	36,04	29,03	23,98
T_{\max} , °C	63,18	62,21	55,05	49,76	42,75	33,63

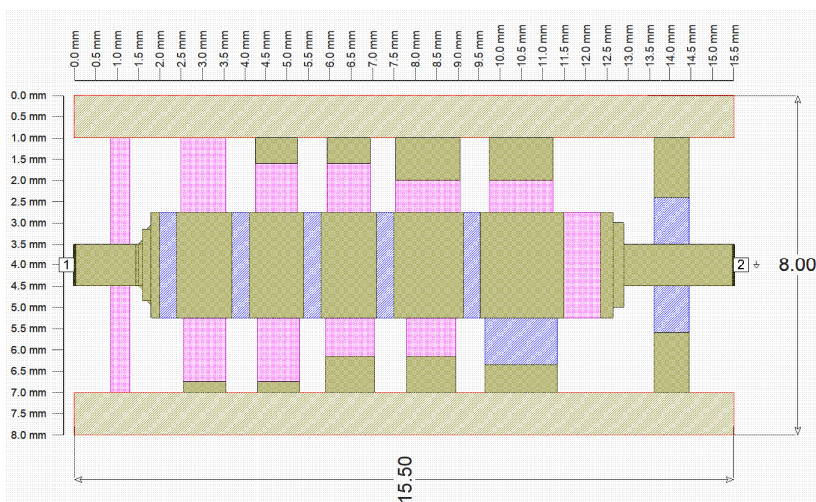


Рис. 1. Топология аттенюатора в программе AWR MWO

Макетирование

Для тестирования проектируемого аттенюатора необходима оснастка. В данном разделе будет рассматриваться ее разработка.

Во время работы аттенюатор нагревается до высоких температур, нам необходимо отводить это тепло. Существует несколько способов отведения тепла, в данном случае наиболее эффективным будет охлаждение посредством теплопроводности [6].

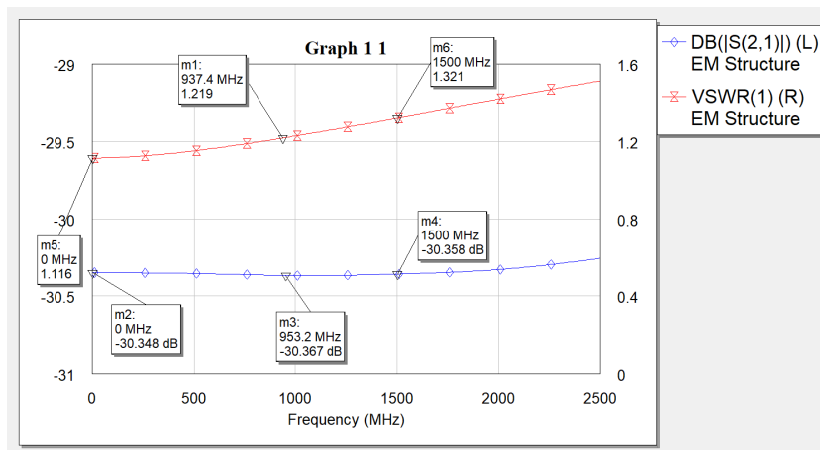


Рис. 2. S-параметры аттенюатора при моделировании в программе AWR MWO

Материалом, из которого изготовлен аттенюатор, является поликор. Это керамика, которая устойчива к высоким температурам и имеет низкий коэффициент температурного расширения. Нижняя сторона аттенюатора металлизирована медью, что в дальнейшем будет использоваться для пайки к оснастке. Размеры аттенюатора составляют $15,5 \times 8$ мм, отсюда площадь поверхности для отведения тепла составляет $1,24 \text{ см}^2$. При максимальных режимах работы на аттенюаторе выделяется порядка 20 Вт тепла. Из чего можно сделать вывод о том, что нам необходимо отводить свыше 16 Вт тепла с одного квадратного сантиметра.

Таблица 2. Сравнение теплопроводности материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Поликор	26–30
Термопаста КПТ-8	1
Термопаста МХ4	8,5
Припой ПОИн 52	34

Для макетирования необходимо закрепить аттенюатор на поверхности, к которой можно присоединить соединители типа SMA, по этой причине мы не можем расположить его напрямую на радиаторе. Для снижения стоимости и ускорения изготовления оснастки было решено использовать покупной алюминиевый радиатор. Для соединения аттенюатора с радиатором спроектирована печатная плата толщиной 0,5 мм

с большим количеством металлизированных переходных отверстий, что обеспечивает лучшую теплопередачу. Для крепления аттенюатора к печатной плате был выбран способ пайки, так как крепление с помощью теплопроводящей пасты или клея не обеспечит достаточную теплопроводность. Для снижения температуры пайки используется припой ПОИн 52, температура плавления которого составляет 118 °С.

Первым этапом на печатную плату (рис. 3) припаивается аттенюатор (рис. 4), далее к этой заготовке по периметру приклеивается каркас толщиной 1 мм, который изготовлен из стеклотекстолита.

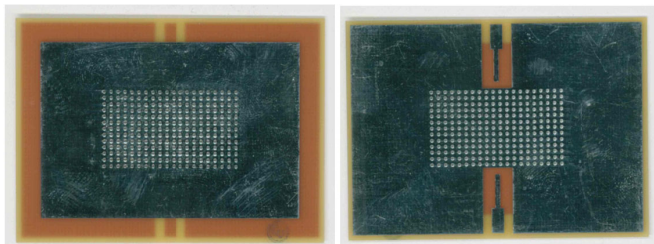


Рис. 3. Печатная плата

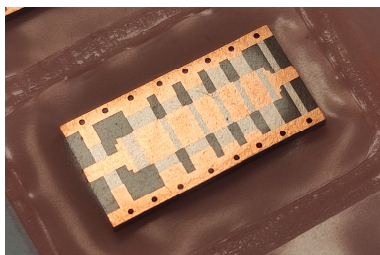


Рис. 4. Аттенюатор

После склеивания деталей происходит пайка соединителей. Следующий этап сборки – это соединение контактных площадок аттенюатора с выводами соединителей, данное соединение происходит медной фольгой, а для снижения воздействия температуры применяется контактная сварка. Завершающий этап сборки это приклеивание радиатора на теплопроводящий клей, который обеспечит надлежащий уровень теплопередачи. Для приклеивания каркаса и радиатора используются материалы, способные выдержать нагрев до 200 °С, что в дальнейшем может понадобиться в случае выхода из строя аттенюатора для его замены.

После окончательной сборки оснастки она должна выглядеть аналогично модели на рис. 5.

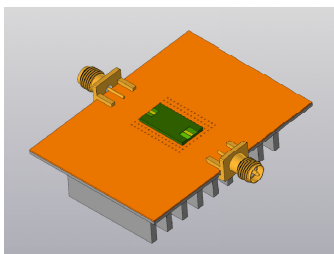


Рис. 5. 3D модель оснастки

Выводы

Использование нестандартной реализации аттенуатора позволило добиться значительного выигрыша в размерах (124 мм^2 против 375 мм^2), что получилось за счет более рационального использования площади платы, при котором зона теплового влияния для каждого диссипативного элемента находится на некотором расстоянии друг от друга. Согласно моделированию был получен КСВ меньше 1,5 и затухание 30 дБ, но точное измерение на изготовленном макете – тема отдельной статьи.

Список использованных источников и литературы

1. *Слуцкая, В. В.* Тонкие пленки в технике СВЧ. – Москва : Сов. радио, 1967. – 456 с.
2. *Галушко, В. А.* Электротехника и основы электроники : учеб.-метод. пособие для студ. факультета «Управление процессами перевозок». – Гомель : БелГУТ, 2012. – 186 с.
3. *Фуско, В.* СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование : пер. с англ. – Москва : Радио и связь, 1990. – 288 с.
4. Исследование влияния электрических, технологических и эксплуатационных характеристик на конструктивные параметры тонкопленочных резисторов: метод. указания / сост. А. И. Меркулов. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 28 с.
5. *Спирин, В. Г.* Метод расчета стационарного теплового режима тонкопленочной микросборки // Труды международного симпозиума «Надежность и качество – 2014». – 2014. – Т. 1. – С. 223–227.
6. Теория тепломассообмена : учебник / под ред. А. И. Леонтьева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2018. – 464 с. – ISBN 978-5-7038-4527-1.

Ja. O. Zolotar', master student

N. V. Dmitriev, master student

E-mail: 550310571@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Development and Layout of a High-Frequency Attenuator

The procedure for designing the design of a powerful attenuator in conditions of limited overall parameters is described. Calculations and simulation results in CAD are presented, as well as the process of developing equipment for checking the attenuator is considered.

Keywords: attenuator, resistive element, thermal calculation, film resistor.

УДК 53.082.5

С. В. Клишин^{1, ✉^a}, канд. физ.-мат. наук, доц.

И. С. Пономарев^{2, ✉^b}, магистрант

E-mail: ^a serklishin@yandex.ru, ^b il.s.pon@mail.ru

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

² АО «Ижевский электромеханический завод «Купол»

Исследование процесса распознавания колебаний в ненапыленном резонаторе твердотельного волнового гироскопа

В данной работе исследуется процесс распознавания колебаний в ненапыленном резонаторе твердотельного волнового гироскопа, а именно возможность измерения колебаний с помощью оптического метода. Обосновывается выбор способа измерения колебаний и датчиков перемещения, предназначенных для измерения колебаний резонатора. Особое внимание уделяется разработке схемы и 3D-модели оснастки измерительной системы. Приводятся результаты эксперимента на скорость срабатывания датчиков перемещения измерительной системы. Разрабатываемая измерительная система позволит оценивать физические параметры ненапыленного кварцевого полусферического резонатора посредством измерения его колебаний.

Ключевые слова: измерительная система, колебания резонатора, датчики перемещения, 3D-модель измерительной системы, скорость срабатывания датчиков, твердотельный волновой гироскоп.

Введение

На данный момент в мире существует множество подвижных объектов и летательных аппаратов, которые нуждаются в высокоточных приборах для повышения определенных характеристик. В настоящее время эффективность и конкурентоспособность летательных аппаратов во многом определяется совершенством гироскопических датчиков.

В твердотельных волновых гироскопах очень жесткие требования к качеству чувствительных элементов – резонаторов. Во время изготовления резонаторов ТВГ происходит большое количество технологических операций, каждая из которых в определенной мере влияет на конечный класс точности гироскопического прибора. Современное высо-

котехнологичное производство требует особых подходов к контролю качества выпускаемой продукции. В том числе необходима реализация различных измерительных систем, которые дают возможность оценить качество и параметры изделий на всех этапах производства.

Постановка задачи

Цель данной работы: измерить колебания ненапыленного кварцевого полусферического резонатора для оценки его физических параметров.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) Произвести анализ существующих измерительных систем, используемых для измерения параметров резонатора.
- 2) Обосновать выбор способа измерения и датчиков перемещения, проверить работоспособность выбранных компонентов.
- 3) Спроектировать и собрать макет, произвести натурный эксперимент.

Сведения из теории

На данный момент существуют четыре измерительные системы, используемые в балансировке и в измерении физических параметров резонатора:

- Измерительная система на основе LCard.
- Измерительная система СКФП.
- Измерительная система на основе 8 электродной пуш-пульной системы управления.
- Измерительная система на основе пьезодатчика.

Все эти системы¹, кроме системы на основе пьезодатчика, позволяют воздействовать на резонатор и получать информацию о колебаниях резонатора с помощью электрического метода съема информации и возбуждения стоячей волны в резонаторе (то есть требуются электроды и напыление). В пьезодатчиках же используется механический метод (т. е. физический контакт с объектом измерения), который каким-либо образом может повлиять на изменение параметров резонатора. Поэтому на данных установках измерение колебаний ненапыленного резонатора невозможно. Как видим, реализованных оптических измерительных систем пока что нет.

Таким образом, в перечисленных системах на ненапыленный резонатор происходит какое-либо воздействие, которое приводит к изменению параметров во время измерения. Нам необходимо от всего этого избавиться, чтобы оценить параметры резонатора до напыления.

¹ Внутренние документы проекта «Твердотельный волновой гироскоп» (080)

Исходя из вышесказанного, рационально использовать оптический способ, то есть оптические датчики (например, фотоэлементы, оптопары), потому что они не оказывают механического воздействия на резонатор и не требуют технологического процесса изготовления, так как их можно приобрести по низкой стоимости в отличие от других датчиков. А также колебания резонатора не зависят от рабочих зазоров, что приводит к упрощению конструкции установки [1].

В результате того, что резонатор полупрозрачный, был выбран теневой метод [2, 3] измерения колебаний, так как в этом случае от кромки резонатора падает четкая тень, с которой можно работать. Схема измерительной системы представлена на рис. 1. Состав и функционирование схемы подробно изложены в работе [1].

Обосновывая выбор фотоприемников для схемы, надо сказать, что фоторезистор не подходит нам по спектру чувствительности, он обладает скоростью срабатывания ниже, чем у других фотоприемников. Фототранзистор высокочувствителен к падающему свету в одном направлении, но в другом может не работать. Фотодиод обладает высоким быстродействием, по сравнению с фототранзистором. Поэтому были подобраны различные фотодиоды [1].

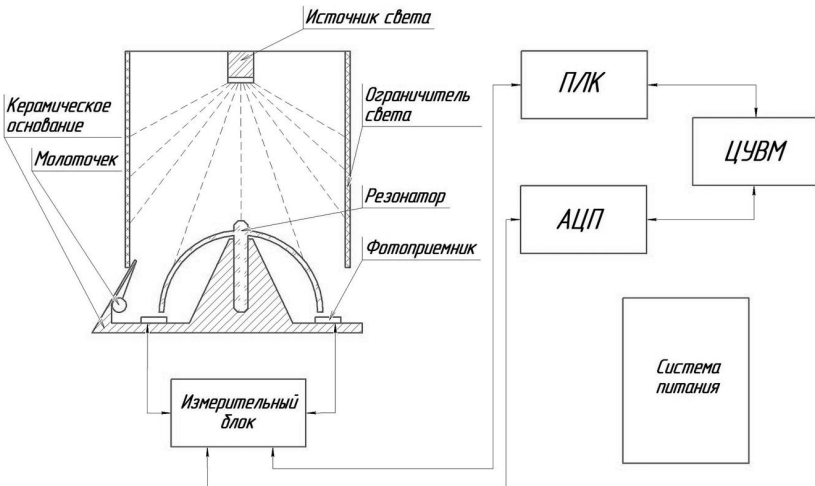


Рис. 1. Схема измерительной системы: ЦУВМ – центральная управляющая вычислительная машина, ПЛК – программируемый логический контроллер, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Описание эксперимента

В целях реализации измерительной системы был организован эксперимент на проверку скорости срабатывания фотоприемников. Для реализации данного эксперимента был создан первоначальный макет, не имеющий оснастки, который состоит из следующих компонентов: генератор ROND&SCHWARZ HMF2550 50 MHz, АЦП L-Card E14-140-M, инфракрасный светодиод BL-L314IRCC, фотодиод BL-L3522PD, одножильный кабель с разъемом BNC-M, одножильный кабель с разъемом DRB-37FA, USB-кабель, ПК с установленными драйверами АЦП и специализированное ПО (осциллограф). Схема макета представлена на рис. 2.

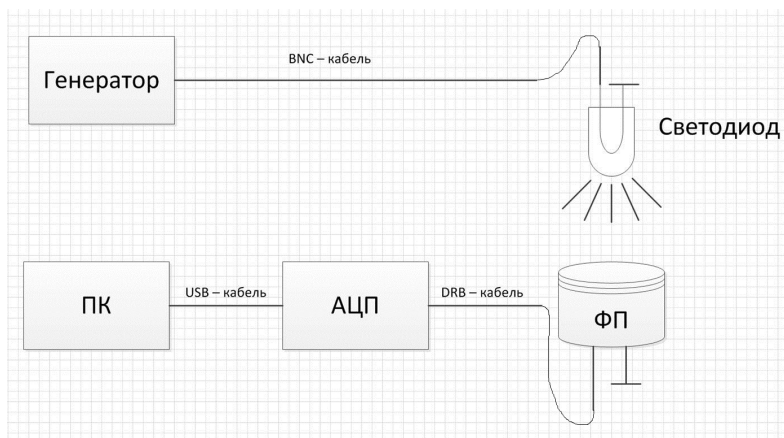


Рис. 2. Схема макета для проверки скорости срабатывания фотоприемников: АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер, ФП – фотоприемник

На светодиод, подключенный к генератору, подаем прямоугольные импульсы напряжением 2 В и частотой 5000 Гц, тем самым имитируя колебания резонатора с заданной частотой. Фотодиод подключаем к АЦП. АЦП подключаем к компьютеру. В программе выводим один канал для наблюдения за поведением сигнала с фотодиода. Так как не разработана оснастка, располагаем вручную светодиод перпендикулярно фотодиоду. Измерения проводили в стандартной освещенности 10 секунд. Результаты съема сигнала через программное обеспечение представлены на рис. 3.

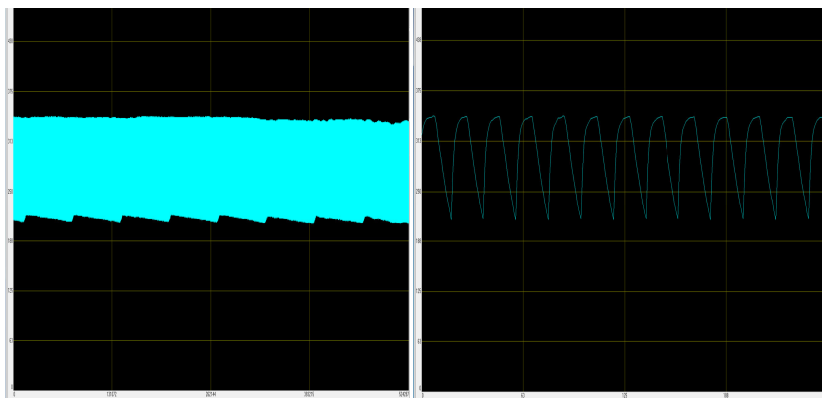


Рис. 3. Окно программы (виртуальный осциллограф): полученный сигнал с фотодиода при частоте 5 кГц светодиода (ось Y – условные единицы; ось X – количество отсчетов)

Результаты и их обсуждение

В результате проведения эксперимента на графиках наглядно видно, что фотоприемник может воспринимать высокочастотные мерцания инфракрасного излучения. Это свидетельствует о том, что колебания тени резонатора будут фиксироваться фотоприемником.

Также из полученных графиков можно сделать вывод, что, подавая прямоугольные импульсы на светодиод, он мерцает с заданной частотой, но плавно включается и медленно выключается (затухает). Об этом свидетельствует не идеальность полученного прямоугольного сигнала на выходе, а точнее сглаженные положительный и отрицательный фронты прямоугольных импульсов.

При этом и других замерах амплитуда выходного сигнала составляла порядка 50–100 мВ в зависимости от расстояния источника света до фотоприемника. В дальнейшей реализации макета измерительной системы предполагается использовать усилители или же суммировать сигналы с датчиков для получения достаточных амплитуд.

Для первоначального макета была разработана 3D-модель оснастки (рис. 4). Следующим этапом планируется распечатать модель на 3D-принтере. В ней предполагается производить дальнейшие эксперименты с резонатором и первые измерения колебаний резонатора для расчета физических параметров.

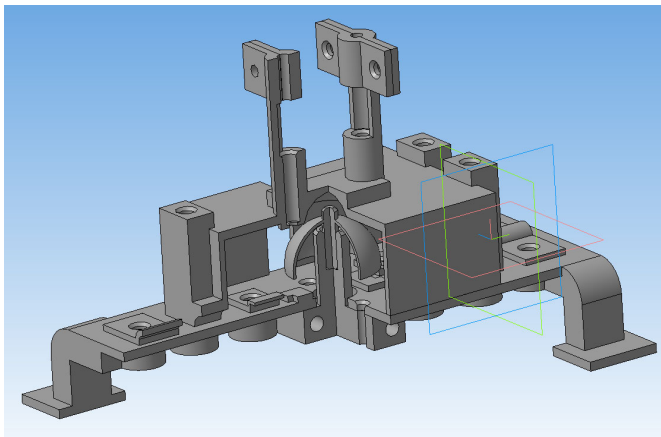


Рис. 4. Разрез 3D-модели оснастки для макета измерительной системы

Выводы

В ходе выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

- 1) Рассмотрены существующие измерительные системы, используемые для измерения параметров резонатора.
- 2) Обоснован выбор способа измерения и датчиков перемещения.
- 3) Разработана схема измерительной системы, имеющая достаточно простое функционирование и недорогие компоненты.
- 4) Разработан первоначальный макет и проведен эксперимент на скорость срабатывания фотоприемников, получены удовлетворительные результаты.
- 5) Предложена 3D-модель оснастки макета измерительной системы.

Список использованных источников и литературы

1. Пономарев, И. С. Исследование процесса измерения параметров ненапыленного резонатора твердотельного волнового гироскопа / И. С. Пономарев, С. В. Клишин // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Ижевск, 26–27 мая 2023 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 292–298. – EDN YHUNWZ.

2. Кирилловский, В. К. Оптические измерения : учеб. пособие / В. К. Кирилловский, Т. В. Точилина. Ч. 1. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – 49 с. – EDN UKQCOQ.

3. Челомей, В. Н. Вибрации в технике : справочник. В 6 т. – Москва : Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания. – 496 с.

S. V. Klishin^{1, ✉^a}, CSc in phys. and math., associate professor

I. S. Ponomarev^{2, ✉^b}, master student

E-mail: ^a serklishin@yandex.ru, ^b il.s.pon@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Joint stock company "Izhevsk Electromechanical Plant "Kupol", Izhevsk

Investigation of the Oscillation Recognition Process in an Unfilled Resonator of a Solid-State Wave Gyroscope

In this paper, the process of recognizing vibrations outside the sputtered resonator of a solid-state wave gyroscope is investigated, namely, the possibility of measuring vibrations using the optical method. The choice of a method for measuring vibrations and displacement sensors designed to measure resonator vibrations is justified. Special attention is paid to the development of a circuit and a 3D model of the instrumentation of the measuring system. The results of an experiment on the response rate of motion sensors of the measuring system are presented. The developed measuring system will allow to evaluate the physical parameters of a non-dusty quartz hemispherical resonator by measuring its vibrations.

Keywords: measuring system, resonator vibrations, motion sensors, 3D model of the measuring system, sensor response rate, solid-state wave gyroscope.

УДК 621.3.011.7:62-231.33(045)

И. В. Князев [✉], аспирант

Д. А. Воронин, магистрант

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.

E-mail: knyazev.knizev@yandex.ru

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

Разработка программы синтеза фрактального электрического импеданса на основе методов Фостера и Кауэра

Дано понятие фрактального электрического импеданса. Отмечено, что ни одна из форм реализации фрактального импеданса не дошла до изготовления в промышленных масштабах. Для экспериментальных целей чаще всего используют фрактальные импедансы на основе многозвенных лестничных RC-цепей, номиналы элементов которых приходится рассчитывать вручную. В работе разработаны алгоритмы и программа синтеза для автоматизации расчетов номиналов элементов цепей, реализующих фрактальный импеданс.

Ключевые слова: фрактальный импеданс, лестничные многозвенные цепи, формы Фостера, формы Кауэра, метод аппроксимации Оусталоупа.

Введение

Фрактальный электрический импеданс описывается уравнением вида [1]:

$$Z_F(j\omega) = F_\alpha (j\omega)^{-\alpha} = F_\alpha e^{-j\alpha\pi/2}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; F_α – константа; α – дробный скейлинг ($0 < \alpha < 1$).

Как следует из (1), фрактальный импеданс в отличие от активного, емкостного и индуктивного импеданса имеет дополнительную степень свободы в виде дробного показателя α зависимости импеданса от частоты. Поэтому его можно использовать для выполнения аналоговых операций дробного интегрирования и дифференцирования электрических сигналов, для создания частотно-избирательных фильтров, генераторов дробного порядка α , для моделирования биоимпедансов и литий-ионных батарей.

В литературе описаны различные способы реализации фрактальных импедансов [2]. Но ни один из них до настоящего времени не реализован как массовый элемент на промышленной основе. Для экспериментальных целей наиболее часто используют RC-цепи на элементах с сосредоточенными параметрами.

Идея синтеза импедансов пассивных двухполюсников не нова. Задается некоторая входная функция цепи и при заданной структуре цепи на каждом этапе выделяется определенное выражение, которое может быть однозначно сопоставлено с физическим элементом цепи. В качестве структуры цепи выбирают обычно канонические цепи Фостера и Кауэра, которые реализуют заданный входной импеданс минимальным числом элементов. Выражение для фрактального импеданса можно получить представлением дробного оператора $1/s^\alpha$ (где s – комплексная частота) в виде дробно-рациональной функции s .

Однако для сравнительной оценки эксплуатационных характеристик различных по структуре цепей для различных значений α с различными диапазонами постоянства фазы ФЧХ фрактального импеданса требуется большое количество расчетов, которые в настоящее время выполняются вручную.

Целью работы является разработка программы синтеза фрактального электрического импеданса на основе методов Фостера и Кауэра в среде Matlab.

Разработка алгоритма формирования функции цепи

Для получения выражения дробно-рациональной функции, аппроксимирующей дробный оператор $1/s^\alpha$, воспользуемся самым распространенным методом аппроксимации операторов дробного порядка – методом Оусталоупа (Alain Oustaloup) [3], который описывается следующими уравнениями:

$$\bar{Z}_N(s) = C \cdot \prod_{i=-N}^N \frac{s + \omega_{zi}}{s + \omega_{pi}}, \quad (2)$$

$$C = \mu^{-\frac{\alpha}{2}} \cdot \prod_{i=-N}^N \frac{\omega_{zi}}{\omega_{pi}}, \quad (3)$$

$$\omega_{zi} = \omega_n \cdot \mu^{\frac{i+N+0,5(1-\alpha)}{2N+1}}, \quad (4)$$

$$\omega_{pi} = \omega_n \cdot \mu^{\frac{i+N+0,5(1+\alpha)}{2N+1}}, \quad (5)$$

где $\mu = \omega_k / \omega_n$ – коэффициент, характеризующий рабочий диапазон частот; ω_k – верхняя граница рабочего диапазона частот; ω_n – нижняя граница рабочего диапазона частот; α – дробный порядок; N – пределы суммирования, определяющие порядок аппроксимирующей функции.

В программе синтеза получение дробно-рациональной функции реализовано с помощью функции «zpk», где ω_{zi} выступает как массив нулей функции, ω_{pi} – массив полюсов функции, а C – коэффициент усиления. Полиномы числителя и знаменателя можно найти с помощью команды «tf», а числитель и знаменатель можем выделить функцией «[num, den] = tfdata».

Разработка алгоритма программы синтеза цепей Фостера и Кауэра

Первая форма Фостера [4] описывается выражением входного импеданса RC-цепи вида:

$$Z_{RC}(s) = k + \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{s - p_i}, \quad (6)$$

где k – коэффициент дробного разложения отношения двух полиномов; n – число звеньев цепи; r_i – вычеты функции цепи; p_i – корни характеристического уравнения функции цепи.

Для получения из уравнения (2) уравнения вида (6) необходимо воспользоваться теоремой разложения, которая преобразует полученную дробно-рациональную функцию в сумму простых дробей. В Matlab для этого существует встроенная функция «[r, p, k] = residue(a, b)». Номиналы резистивных и емкостных элементов цепи вычислим, используя следующие выражения: $R_0 = k$, $C_i = 1/r_i$, $R_i = -r_i/p_i$, где C_i и R_i – номиналы конденсаторов и резисторов звеньев цепи первой формы Фостера.

Вторая форма Фостера [4] описывается выражением входного импеданса RC-цепи вида:

$$Y_{RC}(s) = \frac{1}{Z_{RC}(s)} \cdot \frac{1}{s} = k + \frac{r}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{s - p_i}, \quad (7)$$

где r – частный случай вычета функции цепи при $p_i = 0$.

Умножение $Z_{RC}(s)$ на s можно реализовать в Matlab с помощью команды «a = conv(a, [1 0])». Далее полученное отношение полиномов преобразуем в сумму простых дробей. Номиналы элементов цепи вычислим, используя следующие выражения: $C_0 = 1/k$, $R_0 = 1/r$,

$C_i = -r_i/p_i$, $R_i = 1/r_i$, где C_i и R_i – номиналы конденсаторов и резисторов звеньев цепи второй формы Фостера.

Первая форма Кауэра [4] описывается выражением входного импеданса RC-цепи вида:

$$Z_{RC}(s) = R_1 + \frac{1}{C_1 s + \frac{\dots}{1}} \dots \frac{1}{R_n + \frac{1}{C_{n-1} s}}, \quad (8)$$

где C_i и R_i – номиналы конденсаторов и резисторов звеньев цепи первой формы Кауэра; n – число звеньев цепи.

Для получения из уравнения (2) уравнения вида (8) необходимо делить полином числителя на полином знаменателя, начиная со старших степеней; частное от деления записываем как номинал сопротивления, а остаток от деления и полином знаменателя переворачиваем и снова делим, получая значение емкостного элемента. Данную процедуру по делению и развороту полиномов производят до тех пор, пока остаток от деления не будет равен нулю.

Описанный алгоритм можно реализовать в Matlab с помощью цикла «while» и встроенной функции деления полиномов «[q, r] = deconv(a, b)», условие выхода из цикла будет нулевое значение остатка r .

Вторая форма Кауэра [4] описывается выражением входного импеданса RC-цепи вида:

$$Y_{RC}(s) = \frac{1}{Z_{RC}(s)} = \frac{1}{C_1 s} + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{\dots}{1}} \dots \frac{1}{\frac{1}{C_{n-1} s} + \frac{1}{R_n}}, \quad (9)$$

где C_i и R_i – номиналы конденсаторов и резисторов звеньев цепи второй формы Кауэра; n – число звеньев цепи.

Для получения из уравнения (2) уравнения вида (9) необходимо использовать тот же алгоритм, что и для первой формы Кауэра, за исключением того, что деление полинома числителя на полином знаменателя необходимо начать с младших степеней. В данном случае в Matlab отсутствуют готовые функции для деления полиномов начиная с младших степеней. Алгоритм деления полиномов, начиная с младших степеней,

начинается с разворота обеих полиномов « $a = \text{fliplr}(a)$ » и « $b = \text{fliplr}(b)$ ». Затем необходимо найти первые ненулевые значения в полиномах a и b и разделить их друг на друга. Результатом деления является частное q . Для вычисления остатка r необходимо из полинома a вычесть полином b , умноженный на q . После чего следует разворот полинома остатка « $r = \text{fliplr}(r)$ ». Остальной алгоритм вычисления номиналов элементов цепи соответствует алгоритму первой формы Кауэра.

Интерфейс разработанной программы синтеза изображен на рис. 1. Номиналы элементов синтезированной цепи выводятся в рабочем поле программы Matlab. Корректность работы программы проверена в схемотехническом редакторе OrCAD.

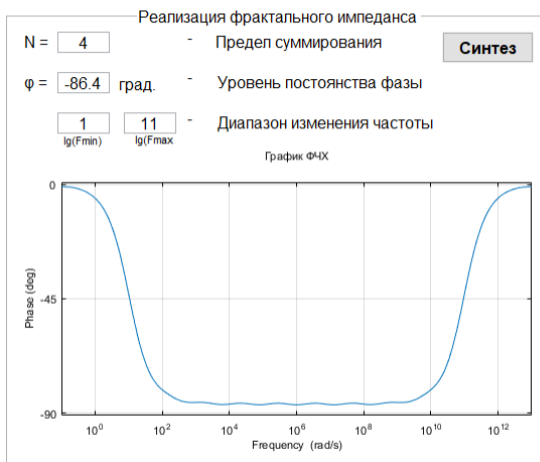


Рис. 1. Интерфейс программы синтеза фрактального импеданса на основе многосвязной лестничной цепи

Вывод

Разработан инструмент для автоматизации расчетов номиналов элементов цепей Фостера и Кауэра, реализующих фрактальный электрический импеданс для различных значений α с различными диапазонами постоянства фазы ФЧХ фрактального импеданса.

Список использованных источников и литературы

1. *Потапов, А. А.* Фрактальные элементы и радиосистемы: Физические аспекты / А. А. Потапов, А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков // под ред. А. А. Потапова. – Москва : Радиотехника. 2009. – 200 с. – ISBN 978-5-88070-228-2.

2. *Shah, Z. M.* A survey of single and multi-component Fractional-Order Elements (FOEs) and their applications / *Z. M. Shah, M. Y. Kathjoo, F. A. Khanday, K. Biswas, C. Psychalinos* // *Microelectronics Journal*. – 2019. – Vol. 84. – Pp. 9-25. – DOI: 10.1016/j.mejo.2018.12.010.

3. *Oustaloup, A.* Diversity and Non-integer Differentiation for System Dynamics. – John Wiley & Sons, Inc. – 2014. – 384 p. – ISBN 978-1-848-21475-0.

4. *Батура М. П.* Теория электрических цепей / *М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулёв*. – 3-е изд., перераб. – Минск : Вышэйш. шк., 2015. - 602 с.

I. V. Knyazev ✉, postgraduate student

D. A. Voronin, master student

P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor

E-mail: knyazev.knizev@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Development of a Fractal Electrical Impedance Synthesis Program Based on Foster and Cowher Methods

The concept of fractal electrical impedance is given. It is noted that none of the forms of fractal impedance realization has reached manufacturing on an industrial scale. For experimental purposes, fractal impedances based on multi-link ladder RC circuits are most often used, the nominal values of the elements of which have to be calculated manually. The paper develops algorithms and a synthesis program for automating calculations of nominal values of circuit elements implementing fractal impedance.

Keywords: fractal impedance, ladder multi-link chains, Foster shapes, Cowher shapes, Oustalope approximation method.

УДК 629.783

А. А. Кудрявцев ^{✉ a}, магистрант
В. А. Глушков ^{✉ b}, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ^a kudravcev-a@mail.ru, ^b GL@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Разработка макета системы одноосной стабилизации наноспутника формата CubeSat

Разработан макет системы стабилизации спутника формата CubeSat. За основу взят набор для сборки Introsat от компании «Образование будущего». Работа включает в себя применение основ гиросtabilизации, программирование и сборку стенда для демонстрации действия стабилизации.

Ключевые слова: стабилизация, CubeSat, кубсат, спутник, макет, гироскоп, маховик.

Введение

Космическое пространство уже с давних пор стало объектом исследования человека. После первого в истории запуска космического аппарата «Спутник-1» в 1957 г. [1] приборостроение изменилось колоссально. Сейчас широкое применение нашел формат миниатюрных спутников, именуемый CubeSat. Один модуль (1U) имеет размер 100×100×100 мм и массу не более 1,33 кг [1]. Вне зависимости от конкретной миссии запускаемого аппарата CubeSat должен обладать системой ориентации и стабилизации.

Ориентация – это процесс, в результате которого космический аппарат (КА) занимает определенное положение или последовательность определенных положений в пространстве [2].

Стабилизация – это процесс устранения неизбежно возникающих в полете угловых отклонений связанной системы координат КА от опорной системы координат. Система стабилизации придает летательному аппарату способность восстанавливать свое первоначальное положение, сопротивляясь действию возмущающих воздействий [2].

Целью настоящей работы является обеспечить автоматическое прекращение угловых перемещений макета спутника формата CubeSat 1U относительно оси подвеса.

Постановка задачи

Науке известно множество способов стабилизации КА, однако оптимальным для большинства задач стала гироскопическая стабилизация (гиростабилизация), принцип работы которой основан на законе механического равновесия. Данный закон гласит, что в любой замкнутой механической системе сумма моментов всех сил, приложенных к телу относительно любой произвольно взятой оси вращения, равна нулю. Это означает, что при сообщении крутящего момента (момента силы) одному телу системы (спутнику) он может быть передан другому телу (маховику). Таким образом, вращение спутника передается маховику, а сам спутник становится неподвижным.

В контексте настоящей статьи вышеуказанное описание гиростабилизации является достаточным, но для более глубокого понимания этого механизма рекомендуется обратиться к специализированному труду [3].

Гиростабилизатор состоит из трех обязательных функциональных блоков: датчик угловой скорости, контроллер (модуль обработки данных) и исполнительное устройство (силовой привод маховика). Датчик передает информацию об угловой скорости КА относительно ортогональных осей модулю обработки данных, который после проведения расчётов задаёт силовому приводу необходимую для компенсации крутящего момента КА скорость вращения.

Решение задачи

В целях решения поставленной задачи был проведен анализ рынка. Среди отобранных вариантов реализации всех трех блоков по отдельности нашлись вполне подходящие предложения, но при создании макета конструкция оказалась бы громоздкой и выглядела бы несуразно. В результате дальнейшего поиска себя обнаружило идеальное решение в виде набора Introsat для сборки макета спутника формата CubeSat компании «Образование будущего». Данный набор позволяет собрать CubeSat в виде блока 1U, состоящего из следующих компонентов:

- модуль акселерометра и гироскопа (датчик);
- модуль обработки данных (STM32F303CCT6 Blackpill);
- модуль материнской платы;
- модуль питания;
- модуль маховика (силовой привод);
- шлейфы коммутации модулей;
- аккумуляторные батареи для модуля питания – 2 шт.;
- приемо-передатчик Bluetooth HC-05;

- программатор ST-Link V2 для загрузки ПО в модуль обработки данных.

Дополнительно в состав испытательного стенда входит персональный компьютер с подключенным к нему через преобразователь интерфейсов USB-UART вторым приемо-передатчиком Bluetooth HC-05, а также рамка подвеса. На рис. 1 приведена структурная схема данного стенда.

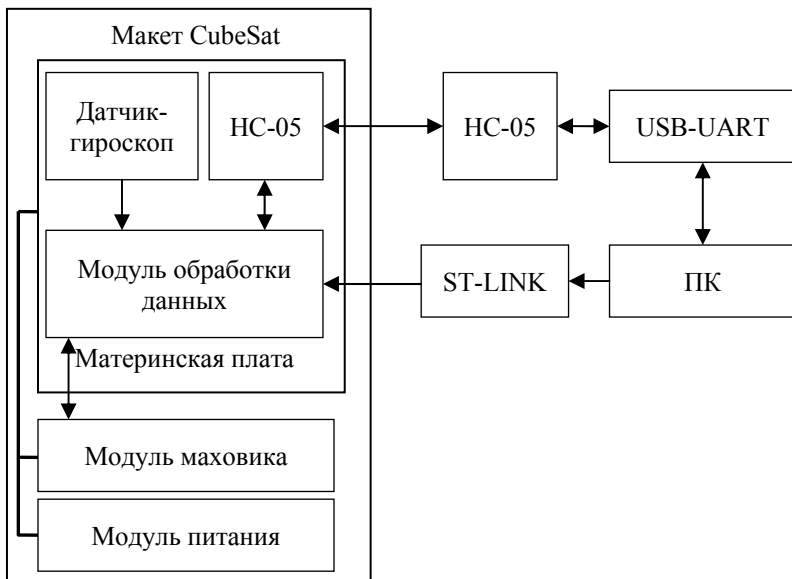


Рис. 1. Структурная схема стенда

На материнской плате располагаются модуль обработки данных, датчик-гироскоп и Bluetooth-модуль HC-05. Гироскоп соединен с модулем обработки данных по шине I2C. HC-05 – через интерфейс UART. Модуль маховика соединен с модулем обработки данных также по шине I2C. Модуль питания подключен как к материнской плате, так и к модулю маховика, обеспечивая стабильные шины питания номиналом 5 В и 3,3 В. Для дистанционного мониторинга состояния, обмена данными и управления макетом CubeSat к персональному компьютеру через преобразователь USB-UART присоединен второй модуль HC-05. Модуль ST-LINK используется для загрузки программы в STM32F303.

На рис. 2, 3 и 4 изображены виды макета спутника и стенда целиком.

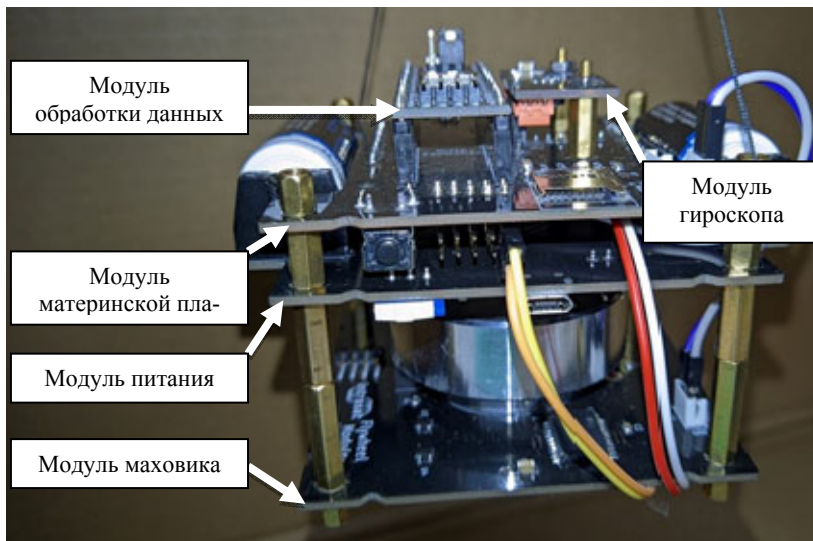


Рис. 2. Макет наноспутника формата CubeSat (вид сбоку)

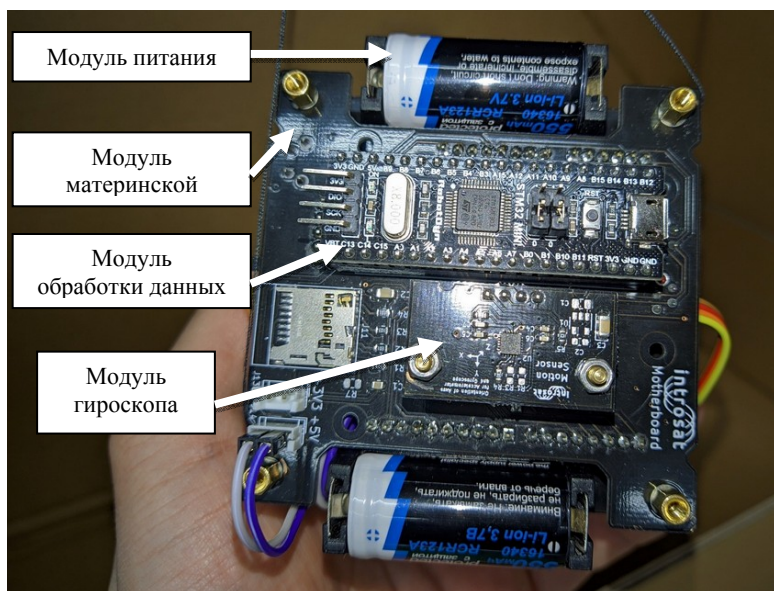


Рис. 3. Макет наноспутника формата CubeSat (вид сверху)

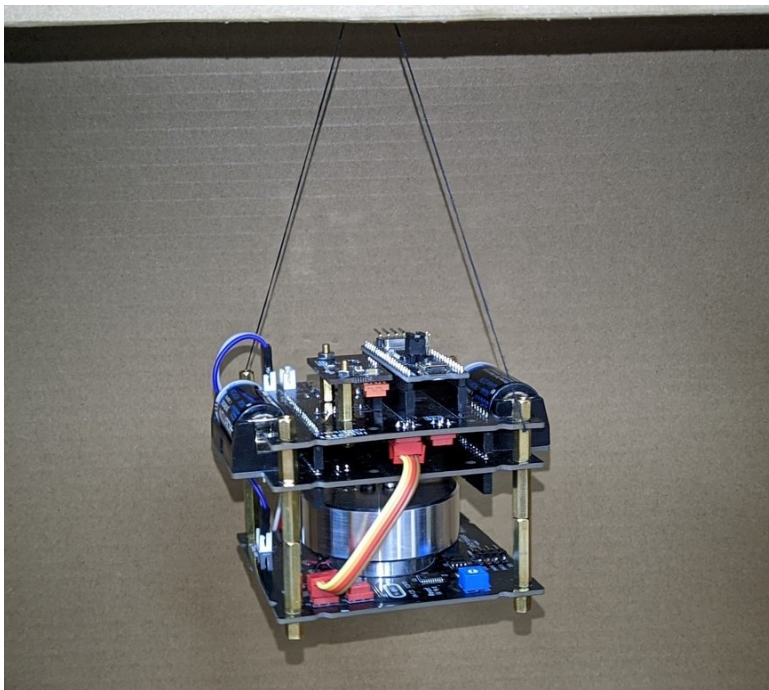


Рис. 4. Макет системы одноосной стабилизации наноспутника формата CubeSat (готовый стенд)

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Сформулировать математически цель процесса управления.
2. Составить алгоритм управления в общем виде.
3. Адаптировать алгоритм управления к вычислительной системе и составить соответствующую программу для микроконтроллерной платформы.
4. Добавить в программу функции обмена данными и получения команд по последовательному порту.
5. Отладить программу и функционирование макета.
6. Добиться достижения цели управления за счет настройки параметров закона управления в программе.

Формулировка цели и определение закона управления

Стабилизация относительно оси подвеса (для варианта монтажа датчика – это ось Z) означает нулевое значение угловой скорости вращения

вокруг нее. Будем считать компоненты угловых скоростей макета относительно осей X и Y равными нулю. Обозначим текущее значение угловой скорости вращения относительно оси Z $\omega_{КА}$, а целевое $\omega_{КА.Ц}$.

Очевидно, что для озвученной выше цели управления $\omega_{КА.Ц} = 0$.

Ошибка управления $\varepsilon = \omega_{КА.Ц} - \omega_{КА} = -\omega_{КА}$.

В качестве алгоритма выберем доказавший свою эффективность ПИД-закон управления по ошибке. Управляющим сигналом в данном случае будет значение угловой скорости вращения маховика, необходимой для компенсации крутящего момента:

$$\omega_M(t) = K_p \cdot \omega_{КА}(t) + K_I \cdot \int_{t_0}^{t_1} \omega_{КА}(t) dt + K_D \cdot \frac{d\omega_{КА}(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $\omega_M(t)$ – угловая скорость маховика; K_p, K_I, K_D – коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего звеньев соответственно; t_0 и t_1 – начальное и конечное время интегрирования соответственно.

Адаптация алгоритма к вычислительной платформе

В формуле (1) коэффициенты пропорциональности каждой из составляющих закона управления K_p, K_I, K_D либо подбираются, либо вычисляются, интеграл вычисляется методом трапеций, а дифференциал методом малых приращений в пределах каждой вычислительной итерации, начало и конец которой определяются моментами времени t_0 и t_1 .

Задание параметров алгоритма и испытания макета

Значения коэффициентов $K_p = 1, K_I = 0,3, K_D = 0,0005$ были определены эмпирически перебором, в результате чего при активации функции стабилизации макет прекращает свободное вращение вокруг оси подвеса. При этом измерения показали, что без стабилизации макет прекращает вращение за 13 секунд вследствие силы трения в точках подвеса, а со стабилизацией – за 6 секунд. Также при испытаниях была выявлена особенность действия алгоритма стабилизации с указанными параметрами: из-за особенностей вычислений происходит перерегулирование в разные стороны относительно положения покоя, в результате чего макет совершает небольшие крутильные колебания. Данную проблему предстоит решить настройкой оптимального сочетания вышеуказанных компонентов.

Выводы

Результатом работы стал макет спутника с действующей системой стабилизации. Правда, макет не лишен недостатков: в процессе функционирования наблюдаются подергивания, которые являются следствием недостаточной точности реализации формулы (1). Для устранения этого явления возможно устанавливать коэффициенты K_p , K_I , K_D не статичными, а путем их автоматической подстройки через обратную связь.

В качестве доработки системы также рекомендуется разработать графический пользовательский интерфейс для дистанционного управления и наглядного представления данных о скорости вращения КА и маховика.

При условии проведения вышеописанных доработок и добавления функции ориентации разработка может найти свое применение в области космических исследований.

Список использованных источников и литературы

1. *Poghosyan, A.* CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions / A. Poghosyan, A. Golkar // Progress in Aerospace Sciences. – 2017. – No. 88 – Pp. 59–83. – EDN YUKGBD.
2. *Понов, В. И.* Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. – Москва : Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. *Пельпор, Д. С.* Гироскопические системы ориентации и стабилизации. – Москва : Машиностроение, 1982. – 165 с.

A. A. Kudryavcev ^{✉^a}, master student
V. A. Glushkov ^{✉^b}, CSc in engineering, associate professor
E-mail: ^a kudravcev-a@mail.ru, ^b GL@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Development of a Layout for a Uniaxial Stabilization System for a “CubeSat” Nanosatellite

A mock-up of the satellite stabilization system in the CubeSat format has been developed. The Introsat assembly kit from the company “Education of the Future” is taken as a basis. The work includes the application of the basics of gyrostabilization, programming and assembly of the stand to demonstrate the effect of stabilization.

Keywords: stabilization, CubeSat, cubesat, satellite, layout, gyroscope, flywheel.

УДК 681.2.088

Р. К. Курзов, студент

П. А. Ветошкин, студент

О. Я. Шамсияхметов, ст. преподаватель

E-mail: kra_dept@istu.ru

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

Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов на основе малогабаритного волнового твердотельного гироскопа

В настоящее время актуальной научно-технической задачей является создание малогабаритной интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы для беспилотных летательных аппаратов. При создании систем управления беспилотных летательных аппаратов существенно повышаются требования к таким показателям, как точность, автономность, надежность, помехозащищенность, габаритно-массовые характеристики, энергопотребление и др. В связи с этим существенное значение имеет создание перспективных систем навигации и ориентации как одного из основных элементов систем управления беспилотными летательными аппаратами.

Ключевые слова: твердотельный гироскоп, беспилотные летательные аппараты, инерциальная навигационная система, анализ гироскопов.

Введение

На сегодняшний день основа современных летательных аппаратов во многом определяется совершенством гироскопических датчиков, на базе которых строятся навигационные системы и системы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). В настоящее время существует большое многообразие различных типов гироскопических датчиков, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные качества БПЛА. Каждому типу гироскопических датчиков можно найти определенное применение. При выборе гироскопического датчика учитываются следующие его основные характеристики: точность, надежность работы, габаритные размеры и стоимость. В зависимости от требований, предъявляемых к системам управления и навигационным системам, выбирается соответствующий тип гироскопического датчика.

Классификация и характеристики БПЛА

В табл. 1 представлена международная классификация БПЛА [1].

Таблица 1. Международная классификация БПЛА

Класс	Наименование / Международное обозначение	Взлетный вес, кг	Радиус действия, км	Практический потолок, м
Легкие	Ближнего действия класса 1	25–50	25–70	3000
	Ближнего действия класса 2	50–150	50–100	3000
Средние	Малой дальности / SR	≤ 200	≤ 150	4000
	Средней дальности / MR	≤ 500	200	5000

Выбраны самые оптимальные классы БПЛА для нашего малоразмерного волнового твердотельного гироскопа (ВТГ).

Интегрированная навигационная система

Управление беспилотным летательным аппаратом с помощью бесплатформенной инерциальной системы ориентации и навигации рассматривается как взаимодействие двух процессов: решения задач ориентации и навигации и решения задачи стабилизации. Первая задача заключается в определении требуемой траектории БПЛА и в вычислении фактической траектории на основе информации, полученной бесплатформенной системой ориентации и навигации. Вторая заключается в управлении БПЛА на основе данных, полученных в результате решения первой задачи [1].

Однако у ИНС есть недостаток – рост ошибок с течением времени. Это связано с наличием инструментальных дрейфов гироскопов.

Одним из наиболее перспективных средств коррекции для интегрированной навигационной системы (ИНС) является спутниковая навигационная система (СНС). Этот класс навигационных систем является наиболее точным из всех бортовых средств, хорошо сопрягается с другими бортовыми средствами, относительно дешев и быстро развивается. При использовании оптимальной обработки информации появляется возможность создания комплексных интегрированных инерциально-спутниковых систем, объединяющих достоинства ИНС и СНС [2].

Для совместной обработки информации от выбранных навигационных систем предложена и реализована структурная схема на базе оптимального фильтра Калмана, подразумевающая как выработку независимых решений в бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС) и СНС, так и комплексного решения, получаемого на основе фильтра Калмана по данным СНС и БИНС. Указанный фильтр на основе данных от СНС-приемника формирует оценку вектора состояния,

включающего ошибки БИНС и инструментальные погрешности ее датчиков, и производит коррекцию БИНС. Структура такой системы показана на рис. 1 [2].

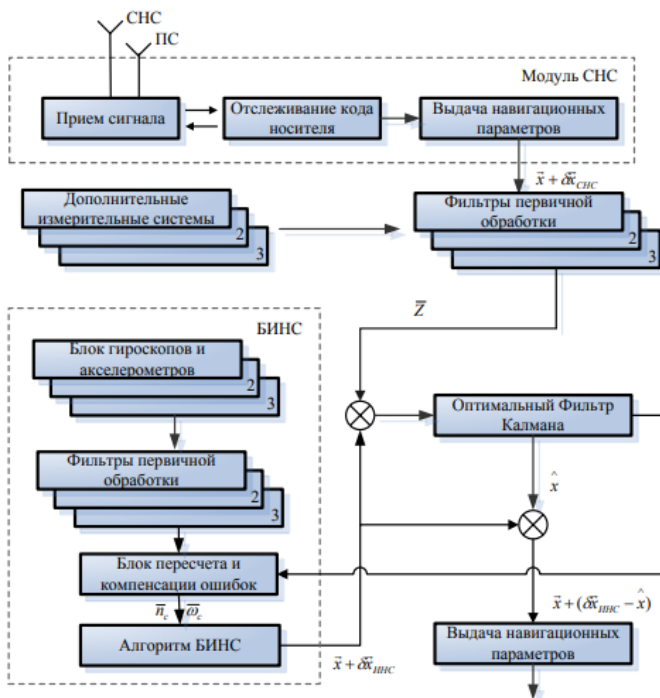


Рис. 1. Структурная схема

Сравнительный анализ гироскопов

Компанией Safran был проведен анализ точностных характеристик различных типов гироскопов. Сравнивались самые основные типы гироскопов, наиболее подходящие по требованиям и характеристикам. Анализ проводился по самым основным параметрам [3] среди кольцевых лазерных гироскопов (КЛГ), волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и волновых твердотельных гироскопов (ВТГ):

1. Основные точностные характеристики гироскопов.
2. Устойчивость гироскопов к воздействиям окружающей среды.
3. Массогабаритные и мощностные характеристики гироскопов.

Оценку анализа можно увидеть в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2. Анализ основных точностных характеристик

Характеристики	Виды гироскопов		
	КЛГ	ВОГ	ВТГ
Систематическая составляющая дрейфа нуля	3	2	3
Нестабильность смещения нуля	3	3	3
Случайный уход по углу	2	3	3
Нестабильность масштабного коэффициента	3	1	3
Рассогласование	3	2	3

Таблица 3. Устойчивость гироскопов к воздействиям окружающей среды

Устойчивость	Виды гироскопов		
	КЛГ	ВОГ	ВТГ
Ударопрочность	3	2	3
Устойчивость к вибрации	3	1	3
Термочувствительность	3	1	3
Устойчивость к радиации	3	2	3

Таблица 4. Массогабаритные и мощностные характеристики гироскопов

МГХ	Виды гироскопов		
	КЛГ	ВОГ	ВТГ
Размер	2	1	3
Масса	1	2	3
Потребляемая мощность	2	3	3

Представленные обобщенные результаты фактического анализа характеристик указанных типов гироскопов, который проводился на гораздо более глубоком уровне, в целом позволяют сделать вывод о том, что ВТГ является оптимальным техническим решением.

Известны разработки ВТГ с малыми габаритами (мини- или микро-ВТГ) [5].

Рассматриваемый нами ВТГ имеет приблизительные габариты резонатора не более 20 мм.

Наихудший прогноз ближних перспектив мирового гироскопического приборостроения касательно ошибки дрейфа волнового твердотельного гироскопа составляет 0,15 °/час [4].

Найдем для нашего малоразмерного ВТГ ошибки в определении скорости, широты и пройденного расстояния. Для этого воспользуемся формулами [4]:

$$\Delta V_{xg} = \varepsilon R (\cos \omega_0 t - 1) \text{ – ошибка определения скорости;}$$

$$\Delta \varphi = \frac{\varepsilon}{\omega_0} (\sin \omega_0 t - \omega_0 t) \text{ – ошибка построения вертикали;}$$

$$\Delta S = \frac{\varepsilon R}{\omega_0} (\sin \omega_0 t - \omega_0 t) - \text{ошибка в определении координаты,}$$

где R – радиус земли; ω_0 – частота Шуллера ($1,23 \times 10^{-3}$ м/с); t – время; ε – дрейф гироскопа в навигационной системе.

Результаты вычислений приведены в графиках ниже (рис. 2–5), где $\varepsilon = 0,1$ град/ч (красная линия); $\varepsilon = 0,15$ град/ч (синяя линия); $\varepsilon = 0,2$ град/ч (зеленая линия).

В ходе проведенного анализа мы можем увидеть ошибки для определенного значения дрейфа гироскопа. По результатам анализа видно, что при дрейфе малоразмерного ВТГ $\varepsilon = 0,15$ °/ч ошибка в построении вертикали составляет не более $0,3^\circ$, ошибка в определении скорости – не более 3,5 м/с, ошибка в определении координат (за 12 мин) – ± 100 м. С учетом дальности и скорости полета малоразмерного БПЛА (дальность не более 10 км, со скоростью 60 км/ч) относительная погрешность не более 1 %.

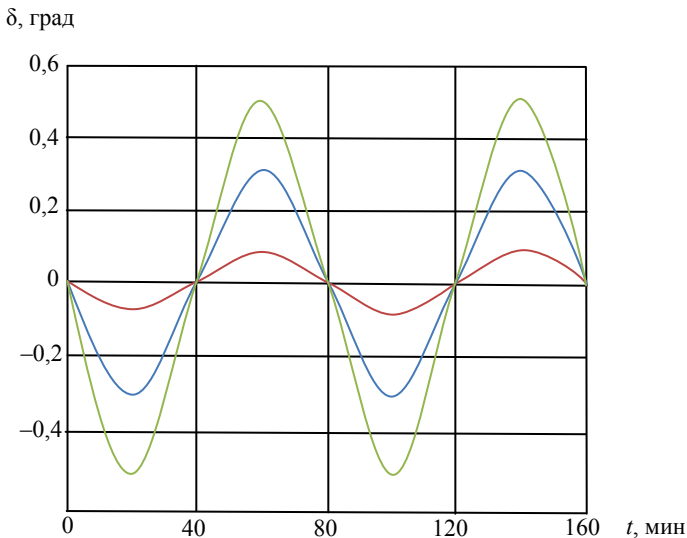


Рис. 2. Ошибка в построении вертикали

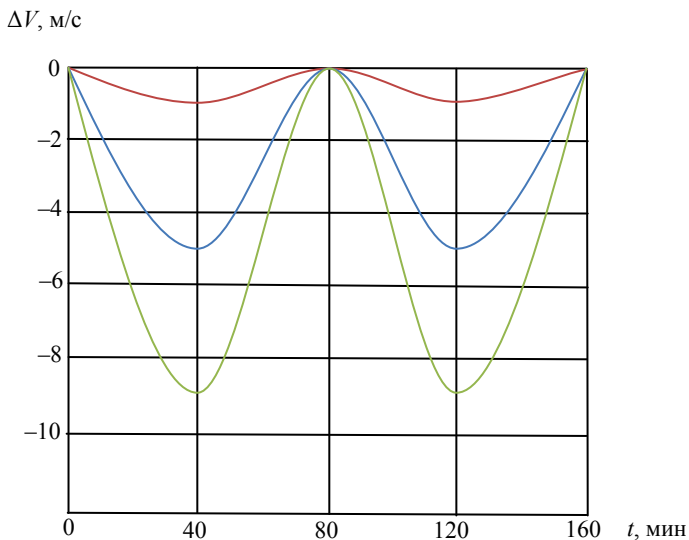


Рис. 3. Ошибка в определении скорости

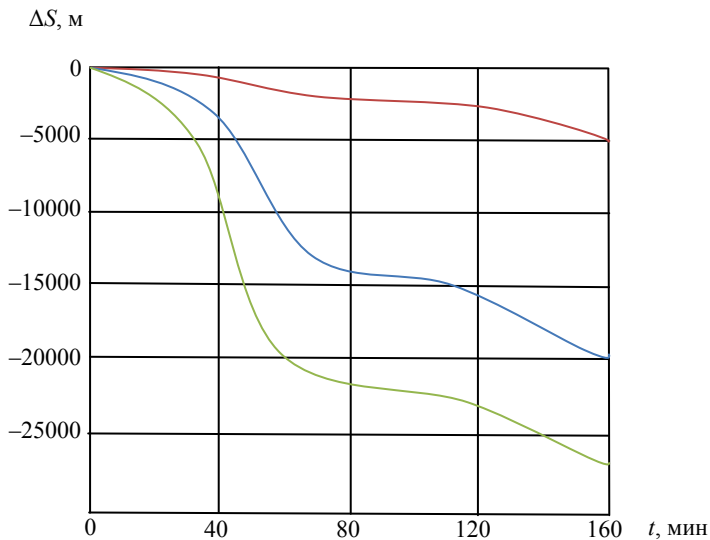


Рис. 4. Ошибка в определении координат в течение 160 мин

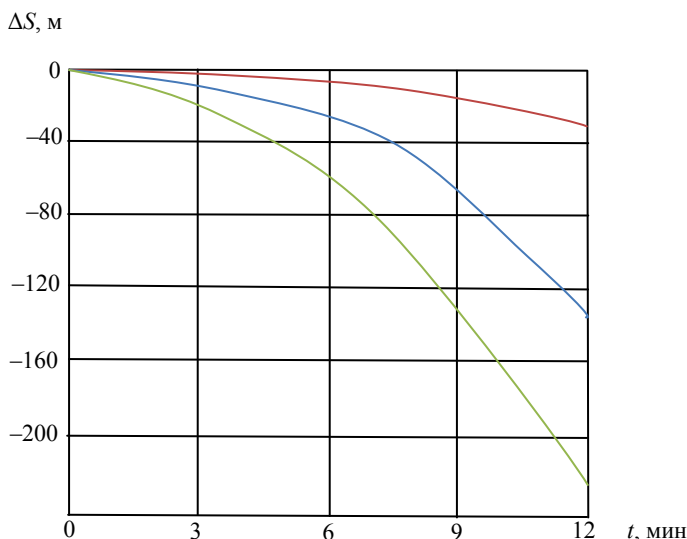


Рис. 5. Ошибка в определении координат в течение 12 мин

Выводы

Проведя вычисления и рассмотрев анализ гироскопических датчиков, пришли к выводу, что:

1. Гироскопы, построенные по типу ТВГ, имеют преимущества перед другими типами.

2. Рассматриваемые ВТГ могут быть применены в БПЛА легкого и среднего классов.

3. Погрешности на уровне $0,15^\circ/\text{ч}$ приводят к приемлемым ошибкам в навигации и ориентации БПЛА в течение 12 мин автономного полета.

4. Рассматриваемый ВТГ за счет своих малых габаритов и приближительных характеристик наиболее перспективен для применения в сфере БПЛА.

Список использованных источников и литературы

1. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В. Я. Распопова. – Москва : Машиностроение, 2011. – 184 с.

2. Пронькин, А. Н. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик / А. Н. Пронькин, И. М. Кузнецов, К. К. Веремеенко // Труды МАИ : электрон. журн. – 2010. – Вып. № 41. – С. 120–124

3. Делэйе, Ф. Бортовая инерциальная система координат Спасенауте для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2018. – № 4 (103). – С. 3–9.

4. Переляев, С. Е. Современное состояние и научно-технический прогноз перспектив применения зарубежных волновых твердотельных гироскопов (аналитический обзор по зарубежным материалам) // Новости навигации – 2020. – № 3. – С. 27–28.

5. Миниатюрные волновые твердотельные гироскопы для малых космических аппаратов / М. А. Басараб, Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, А. В. Фомичев, Е. А. Чуманкин, А. В. Юрин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение. – 2014. – № 4. – С. 80–96.

R. K. Kurzov, student

P. A. Vetoshkin, student

O. Ya. Shamsiakhmetov, senior lecturer

E-mail: kra_dept@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Integrated Navigation System for Unmanned Aerial Vehicles Based on a Small Wave Solid-State Gyroscope

Currently, an urgent scientific and technical task is the creation of a small-sized integrated free-form inertial navigation system for unmanned aerial vehicles. When creating control systems for unmanned aerial vehicles, the requirements for such indicators as accuracy, autonomy, reliability, noise immunity, dimensional and mass characteristics, energy consumption, etc. are significantly increased. In this regard, it is essential to create promising navigation and orientation systems as one of the main elements of pilotless aircraft control systems

Keywords: solid-state gyroscope, unmanned aerial vehicles, inertial navigation system, gyroscope analysis.

УДК 531.383

А. Л. Светлаков^{1, 2, ✉^a}, магистрант
И. Д. Измestьев^{2, ✉^b}, инженер-конструктор
*Г. А. Трутнев*², зам. гл. конструктора
E-mail: ^a andreys_05@mail.ru, ^b i.d.izmestev@mail.ru

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

² Акционерное общество «Ижевский электромеханический завод «Купол»,
г. Ижевск

Особенности настройки измерительной компоненты твердотельного волнового гироскопа

Рассматривается твердотельный волновой гироскоп. Изучаются возможные способы конструирования измерительной компоненты твердотельного волнового гироскопа. Анализируются данные из научной литературы об особенностях измерительной компоненты на переменном токе. На основе принципиальной схемы выводится математическая модель преобразования перемещения кромки резонатора твердотельного волнового гироскопа в электрические напряжения. Рассмотрен случай идеальных параметров измерительной компоненты и показан вид выходного напряжения, состоящего из суммы гармоник двух различных частот. Проведен анализ возможных отклонений параметров измерительной компоненты от идеальных значений. Получен общий вид выходного напряжения измерительной компоненты, состоящей из слагаемых трех различных частот. Проведено экспериментальное подтверждение влияния паразитных частот на точностные характеристики твердотельного волнового гироскопа. Описан эксперимент с опытным образцом. Получены зависимости точностного параметра опытного образца гироскопического прибора от уровня паразитного сигнала. Показано уменьшение шумовой характеристики выходного значения ТВГ более чем в три раза при настройке параметров измерительной компоненты – дисбаланса усиления сигналов датчиков перемещения. Предложена методика настройки параметров измерительной компоненты с целью увеличения точностных характеристик гироскопического прибора. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию исследования особенностей измерительной компоненты на переменном токе.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, измерительная компонента, переменное напряжение, точностные параметры, методика настройки.

Введение

Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) – перспективный измерительный прибор, основанный на эффекте Брайана [1, 2]. Одной из актуальных задач в области ТВГ является повышение точностных характеристик измерительной компоненты, которые напрямую влияют на итоговую точность измерения угловых скоростей с помощью твердотельного волнового гироскопа. В научной литературе выделяют следующие узлы ТВГ: чувствительный элемент, измерительную подсистему, подсистему управления динамикой чувствительного элемента и вычислительную компоненту. Первые три узла относят к измерительной компоненте (ИК). К основным типам ИК ТВГ относятся: ИК на постоянном токе, ИК на переменном токе [3]. Особенности ИК на переменном токе являются:

1) Гибкость. Возможен выбор частот, на которых передается информация о динамике ТВГ, для уменьшения влияния различных наводок и шумов.

2) Технологичность. Доступна для применения более простая конструкция буферного усилителя ввиду меньшего внутреннего сопротивления электродов на переменном токе в сравнении с ИК на постоянном токе.

3) Потенциально меньшая точность. Ограничения на выбор частоты опроса аналого-цифровых преобразователей для последующей корректной демодуляции сигналов.

Постановка задачи

Типовая принципиальная электрическая схема одного из информационных каналов ТВГ представлена на рис. 1.

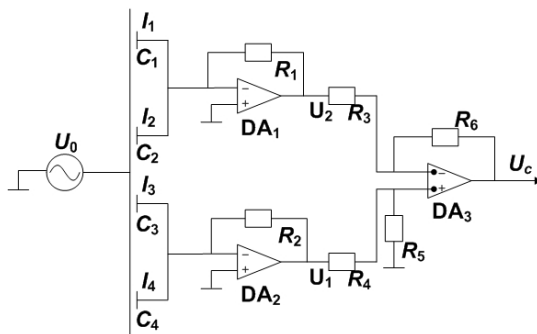


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема одного из информационных каналов ИК ТВГ на переменном токе: I – сила тока; C – емкость; R – сопротивление; DA – операционный усилитель; U – напряжение

Обычно ИК ТВГ формируется двумя информационными каналами. Напряжение U_c описывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 U_c &= U_1 \cdot R_5 / (R_3 + R_4) / R_3 \cdot (R_3 + R_6) - U_2 \cdot R_6 / R_3, \\
 U_1 &= -(I_1 + I_2) / R_1, \quad U_2 = -(I_3 + I_4) / R_2, \\
 I_k &= U_0' \cdot C_k + U_0 \cdot C_k', \quad k = 1, 2, 3, 4, \\
 U_0 &= \cos(k\omega t + \psi), \\
 C_k &= \varepsilon \varepsilon_0 S_k / d_k / (1 + x), \quad k = 1, 2, \\
 C_k &= \varepsilon \varepsilon_0 S_k / d_k / (1 - x), \quad k = 3, 4,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ω – частота резонатора; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; S_1, S_3, S_5, S_7 – площади емкостных датчиков перемещения измерительной подсистемы ТВГ; d_1, d_3, d_5, d_7 – расстояние между обкладками емкостных датчиков; x – относительное перемещение кромки резонатора напротив соответствующих датчиков перемещения.

В идеальном случае: $S_1 = S_3 = S_5 = S_7, d_1 = d_3 = d_5 = d_7$ – и в этом случае выходное напряжение представляет собой сумму гармоник на двух частотах (рис. 2, а):

$$\begin{aligned}
 U_c &= A \cdot \cos((k-1)t) + B \cdot \cos((k+1)t) + \\
 &+ C \cdot \sin((k-1)t) + D \cdot \sin((k+1)t).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Реальный сигнал информационного канала ИК на переменном токе при условии $S_1 \neq S_3 \neq S_5 \neq S_7, d_1 \neq d_3 \neq d_5 \neq d_7$ будет представлять собой сумму гармоник трех частот (рис. 2, б):

$$\begin{aligned}
 U_c &= A \cdot \cos((k-1)t) + B \cdot \cos((k+1)t) + C \cdot \sin((k-1)t) + \\
 &+ D \cdot \sin((k+1)t) + F \cdot \cos(kt) + G \cdot \sin(kt).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Амплитуды A, B, C, D являются полезными составляющими и содержат информацию о фазовых переменных волновой картины в резонаторе, амплитуды F и G – паразитные, вносящие искажения в оценку значений фазовых переменных волны и, как следствие, ухудшающие итоговую точность ТВГ.

Для определения волновой картины колебаний резонатора ТВГ напряжение информационных каналов ИК оцифруется и поступает в процессор. По данным одного цикла колебаний резонатора процессор выполняет дискретное преобразование Фурье, чтобы определить величины

амплитуд A, B, C, D , Фурье-преобразование выполняет еще и функцию фильтрации сигналов, однако из-за эффекта «растекания» спектра амплитуды F, G могут оказывать влияние на полезный сигнал. Для выявления влияния дисбаланса буферного усилителя на точностные характеристики гироскопического прибора был проведен эксперимент с опытным образцом.

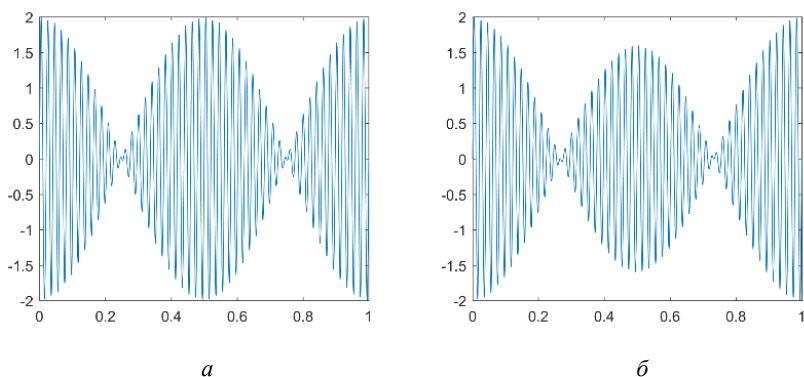


Рис. 2. Вид выходного сигнала одного из информационных каналов ИК ТВГ: a – при идеальном настроенном усилении сигналов отдельных датчиков перемещения; b – при наличии дисбаланса в 10 %

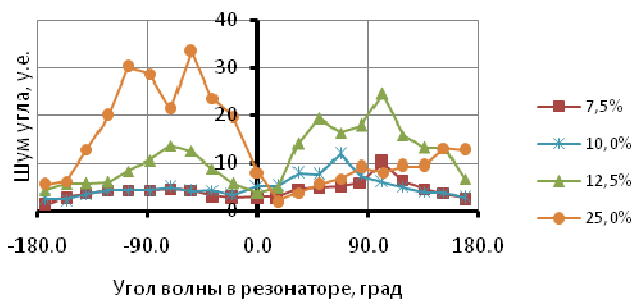
Описание эксперимента

Все экспериментальные измерения были произведены на опытном образце, включающем в себя измерительную компоненту на переменном токе. Перестройке подвергался дифференциальный усилитель DA_3 синусного канала ИК. Параметры косинусного информационного канала опытного образца настроены на оптимальные значения. Были проведены оценки шумовых характеристик выходного сигнала ТВГ для четырех значений дисбаланса синусного канала измерительной компоненты. Экспериментально исследовалось влияние дисбаланса измерительной компоненты на уровень шума выходного сигнала.

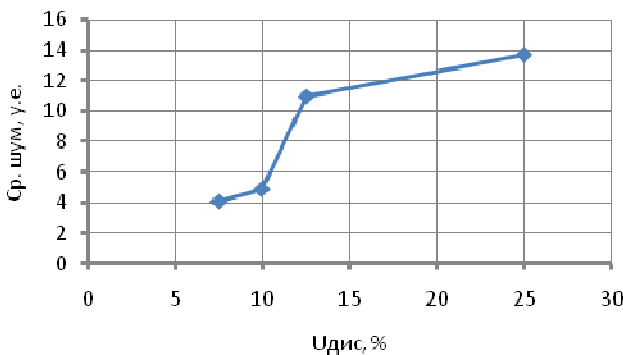
Результаты и их обсуждение

При оценке шумовых характеристик учитывался фактор углового положения волны в резонаторе ТВГ. Полученные зависимости уровня шума (среднее квадратичное отклонение) в различных угловых положениях волны приведены на рис. 3, a . Отметим, что шум имеет большие величины в углах, соответствующих максимальному напряжению си-

нусного канала, что согласуется с установленными значениями дисбаланса синусного канала. Второй канал – косинусный, настроен на минимальное значение амплитуд F и G , что также согласуется с минимальным уровнем шума в угловых положениях 0 и 180 градусов.



а



б

Рис. 3. Зависимость шума от степени разбалансированности канала: шум от углового положения волны (а); средний шум от относительного напряжения дисбаланса (б)

Графики зависимости среднего по всем угловым положениям СКО шума от значения дисбаланса усиления информационного канала приведены на рис. 3, б. Видно, что зависимости носят нелинейный характер и при увеличении уровня дисбаланса существенно ухудшаются точностные характеристики ТВГ.

Для минимизации уровня шума выходного сигнала ТВГ предлагается следующая методика настройки ИК: 1) Подать переменное напряже-

ние U_0 на резонатор ТВГ без включения позиционного и параметрического возбуждения. 2) Убедиться в отсутствии значимых амплитуд сигналов на частотах, кроме U_0 . 3) Настройка дисбаланса производится подстройкой резистора R_5 в цепи операционного усилителя DA_3 . Изменяя сопротивление R_5 , необходимо добиться минимального значения напряжения. 4) На экране осциллографа контролируется уровень сигнала информационного канала ИК, характеризующий паразитные амплитуды F и G .

Выводы

Точность выходного сигнала ТВГ на переменном токе во многом определяется качеством настройки параметров ИК. Повышение точностных характеристик достигается путем настройки дисбаланса по методике, предложенной в данной работе. Показано, что шумовые характеристики уменьшаются более чем в три раза. Экспериментально выявлено существенное влияние напряжения дисбаланса буферного усилителя на величины шума угла ТВГ. Дальнейшее исследование влияния дисбаланса на точностные характеристики требует распределения уровня сигнала между амплитудами F и G , построения имитационной модели и проведения численных экспериментов, а также необходимо выявления факторов минимального достижимого уровня дисбаланса информационного канала.

Список использованных источников и литературы

1. Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций / А. А. Маслов, Д. А. Маслов, И. Г. Ниналалов, И. В. Меркурьев // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, № 1 (120). – С. 3–25. – EDN BJLSLM.
2. A Novel Model for Fully Closed-Loop System of Hemispherical Resonator Gyroscope under Force-to-Rebalance Mode / Z. Xu, B. Xi, G. Yiand, D. Wang. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69. – Pp. 9918-9930. – DOI: 10.1109/TIM.2020.3005282.
3. Трутнев, Г. А. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа / Г. А. Трутнев, К. К. Перевозчиков, С. Б. Назаров // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2020. – № 1 (130). – С. 50–63. – DOI: 10.18698/0236-3933-2020-1-50-63. – EDN TGCWSN.

A. L. Svetlakov^{1, 2, ✉}, master student

I. D. Izmetiev^{2, ✉, b}, design engineer

*G. A. Trutnev*², deputy chief designer

E-mail: ^a andreys_05@mail.ru, ^b i.d.izmetev@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Joint Stock Company "Izhevsk Electromechanical Plant "Kupol", Izhevsk

Features of Setting up the Measuring Component of a Solid-State Wave Gyroscope

A solid-state wave gyroscope is considered. Possible methods for designing the measuring component of a solid-state wave gyroscope are being studied. Data from the scientific literature on the features of the measuring component on alternating current are analyzed. Based on the circuit diagram, a mathematical model is derived for converting the displacement of the resonator edge of a solid-state wave gyroscope into electrical voltages. The case of ideal parameters of the measuring component is considered and the type of output voltage, consisting of the sum of harmonics of two different frequencies, is shown. An analysis of possible deviations of the parameters of the measuring component from ideal values was carried out. A general view of the output voltage of the measuring component, consisting of terms of three different frequencies, is obtained. An experimental confirmation of the influence of parasitic frequencies on the accuracy characteristics of a solid-state wave gyroscope was carried out. An experiment with a prototype is described. The dependences of the accuracy parameter of a prototype gyroscopic device on the level of the parasitic signal were obtained. It is shown that the noise characteristics of the output values of the TVG decrease by more than three times when adjusting the parameters of the measuring component - the imbalance in the amplification of the signals of the displacement sensors. A technique is proposed for adjusting the parameters of the measuring component in order to increase the accuracy characteristics of the gyroscopic device. Recommendations are given for further improvement of the study of the characteristics of the measuring component on alternating current.

Keywords: solid-state wave gyroscope, measuring component, alternating voltage, accuracy parameters, tuning technique.

Секция 2. Электротехнические системы и комплексы

УДК 622.235.432, 622.235.432.3

А. О. Игноватова ^{✉^a}, студент

А. С. Шангин ^{✉^b}, аспирант

М. С. Гречухина ^{✉^c}, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

С. Ю. Ганигин ^{✉^d}, д-р техн. наук, проф.

E-mail: ^a ignovatova.lelya@yandex.ru, ^b alex.shangin2010@yandex.ru,
^c mary19@yandex.ru, ^d ganigin.s.yu@yandex.ru

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Использование реакционных материалов в конструкции электродетонатора

В работе оценивается возможность применения мостика, содержащего реакционные материалы, в конструкции электродетонатора, используемого при электрическом способе взрывания. Вывод о включении реакционных материалов в состав конструкции делается на основе проведенных экспериментов и результатах скорости метаемого тела.

Ключевые слова: электродетонатор, реакционноспособные материалы, оценка, электрический взрыв, макет.

Введение

В настоящее время популярность набирает электрический способ взрывания [1] ввиду использования простой конструкции и получения эффективного результата. Принцип работы при таком взрыве состоит в следующем: электроэнергия, которая вырабатывается источниками тока, поступает по проводам в электродетонатор и вызывает их срабатывание и последующее инициирование основных зарядов. В классической схеме такой системы применяется электродетонатор, состоящий из проволоочки и фольги. Для обеспечения наилучших результатов мета-

© Игноватова А. О., Шангин А. С., Гречухина М. С., Ганигин С. Ю., 2024

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

тельного действия рассматривается возможность замены штатных материалов на реакционноспособные [2, 3].

Описание эксперимента

Для оценки возможности применения реакционных материалов [4] и принятия решения о наиболее эффективном составе мостика был разработан макет электродетонатора.

Корпус электродетонатора был изготовлен с помощью вытравливания ненужной части меди, покрывающей нижнюю часть пластинки текстолита. Для этого применялась фотопечатная бумага с рисунком в виде ламелей, обеспечивающих работоспособность покрытия за счет прохождения тока через рисунок. Таким образом, платы выдерживали большую нагрузку током. В то время как верхняя плата также была текстолитовой и бралась без медного покрытия. Между собой они скреплялись с помощью винтов, вставляемых в просверленные отверстия. Помимо винтовых, в верхней плате просверливалось отверстие, через которое будет вылетать метаемое тело, в роли которого выступает полиамидная пленка [2].

Для изготовления мостика электродетонатора рассчитывалась необходимая масса и пропорции навески. При достижении толщины пластинки 55 мкм из нее скальпелем вырезали мостик размером 0,5×0,5 мм.

Внешний вид электровзрывной системы представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид электровзрывной системы

Для проведения эксперимента были выбраны следующие составы мостиков из реакционных материалов: Al-Ni и Ni-Ti.

Результаты и их обсуждение

Эксперимент проводился на базе Самарского государственного университета (ФГБОУ ВО «СамГТУ»). Для выявления скорости разгона рабочего тела (полиамидной пленки) в зависимости от использования и состава мостика из реакционных материалов испытания проводились

на магнитно-импульсной установке. При этом результаты опытов фиксировались с помощью графика формы импульса и высокоскоростной камеры. Графики формы импульса по результатам эксперимента представлены на рис. 2.

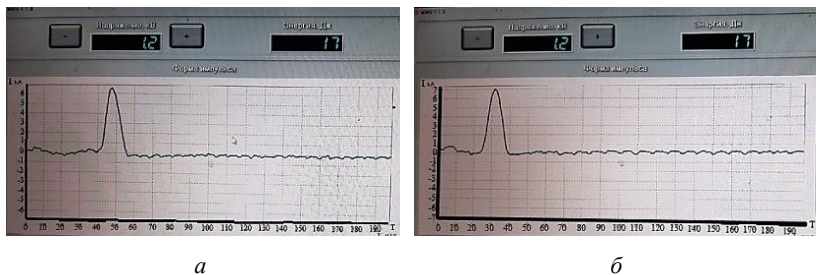


Рис. 2. Графики формы импульсов, подаваемых на электродетонаторы:
a – мостик из Ni-Ti; *б* – мостик из Al-Ni

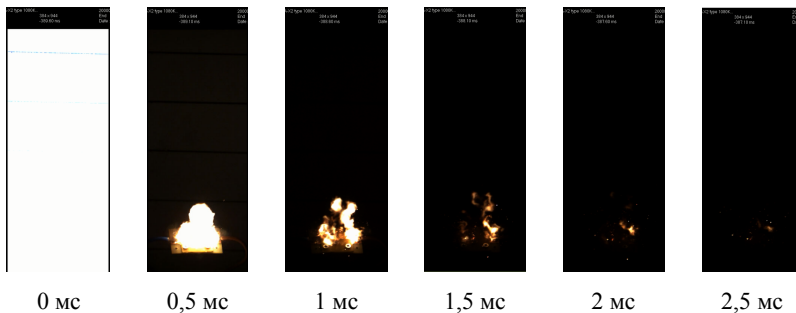


Рис. 3. Раскадровка испытаний электродетонатора с мостиком из Ni-Ti

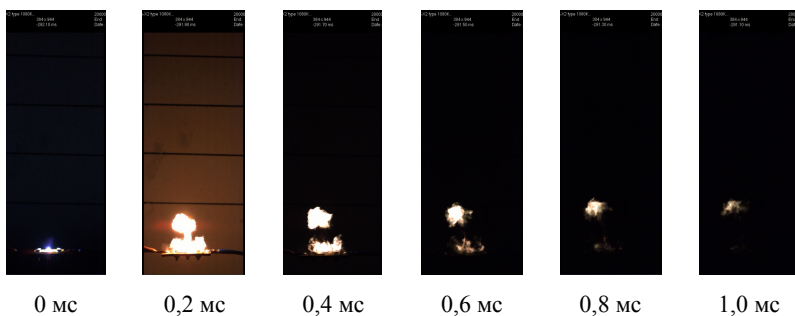


Рис. 4. Раскадровка испытаний электродетонатора с мостиком из Al-Ni

Из графиков видно, что перед скачком импульса тока имеется задержка от 30 до 40 мкс, а также расхождение в силе скачка импульса от 6,2 до 6,4 кА. Это объясняется следующим образом: задержка перед скачком тока может быть связана с некоторой разницей толщин ламелей, а расхождение силы скачка импульса – с небольшой погрешностью в размерах и разным составом материала мостика.

Рассмотрим разницу скорости метаемых тел исходя из кадров, сделанных на высокоскоростную камеру (рис. 3, 4).

Результаты скоростей метаемых тел приведены в таблице.

Скорости метаемых тел и лучей огня

Порядок	Состав мостиков	Скорость метаемого тела, м/с
1	Ni-Ti	213,25
2	Al-Ni	349

Исходя из этого можно сделать вывод, что при применении мостика из реакционного материала состава Al-Ni скорость метаемого тела выше, чем скорость метаемого тела с составом мостика из Ni-Ti примерно в 1,5 раза. Это связано с тем, что Al взаимодействует с Ni, выделяя наибольшее количество энергии, чем при взаимодействии с Ti.

Выводы

Использование реакционных материалов в качестве состава мостика электродетонатора при электрическом способе взрывания возможно. Также при проведении эксперимента было обнаружено, что состав мостика из Al-Ni является наиболее энергоспособным за счет соединения с Al. В настоящее время эффективным выступает электрический способ взрывания, который является наиболее безопасным, а использование при этом мостиков из реакционноспособных материалов позволяет увеличить скорость метаемого тела и прийти на замену штатным составляющим электродетонатора.

Список использованных источников и литературы

1. Strategy for Increasing Flyer Launching Capacity of Electro-Explosively Actuator by Coupling Electric Explosion and Plasma Discharge / K. Wang, X. Cong, P. Zhu, Q. Zhang, Z. Yang, S. Ruiqi // Sensors and Actuators A: Physical. – 2021. – Vol. 322. – P. 112609. – DOI: 10.1016/j.sna.2021.112609.

2. Куренков, В. Ф. Химия и физика высокомолекулярных соединений / учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Казань : Бутлеровское наследие, 2009. – 292 с.

3. Ударно-волновое инициирование экзотермических превращений в реакционных материалах W–Al–ПТФЭ / И. В. Сайков, С. А. Серопян, Г. Р. Сайкова,

М. И. Алымов // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2020. – Т. 492-493 – С. 162–166.

4. Патент № 2744805 Российская Федерация, МПК С23С 4/126. Способ нанесения реакционноспособного покрытия на основе Ni-Al : № 2020113997 : заявл. 03.04.2020 : опубл. 15.03.21. / Ненашев М. В., Деморецкий Д. А., Ганигин С. Ю., Нечаев И. В., Кузнецов И. А., Новиков А. А., Симогин В. Л., Мурзин А. Ю., Попов А. Г., Нурмухаметов А. Т., Альдебенев Н. С., Гречухина М. С., Тонеев И. Р.

A. O. Ignovatova ^{✉ a}, student

A.S. Shangin ^{✉ b}, postgraduate student

M. S. Grechukhina ^{✉ c}, CSc in engineering, senior researcher

S. Yu. Ganigin ^{✉ d}, DSc in engineering, professor

E-mail: ^a ignovatova.lelya@yandex.ru, ^b alex.shangin2010@yandex.ru,

^c mary19@yandex.ru, ^d ganigin.s.yu@yandex.ru

Samara State Technical University, Samara

The Use of Reaction Materials in the Design of an Electric Detonator

The paper evaluates the possibility of using a variety of promotional materials in the design of an electric detonator used in the electric method of detonation. The conclusion about the inclusion of reaction materials in the structure is made on the basis of the conducted experiments and the results of the velocity of the thrown body.

Keywords: electric detonator, reactive materials, evaluation, electric explosion, layout.

УДК 621.331

П. А. Санников, аспирант
E-mail: pavelsannikov2000@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Идентификация электрических параметров г ибридного шагового двигателя при различных режимах управления

В статье представлена методика идентификации электрических параметров гибридного шагового двигателя (ГШД) 34HS5435C-02B2 на основе метода наименьших квадратов. В ходе эксперимента получены значения параметров электрической части математической модели ГШД (сопротивление, индуктивность обмоток, потокосцепление) при двух режимах управления – при полношаговом и при дроблении шага 1/16. Проведено сравнение полученных параметров с заявленными производителем номинальными характеристиками исследуемого ГШД. Относительные погрешности в полношаговом режиме и в режиме дробления шага 1/16 при определении потокосцепления составили 15,42 % и 2,29 %, при определении сопротивления обмоток – 15,42 % и 3,13 %, при определении индуктивности обмоток – 17,72 % и 60,91 % соответственно.

Ключевые слова: гибридный шаговый двигатель, идентификация, метод наименьших квадратов.

Введение

Синхронные двигатели (в частности, шаговые двигатели (ШД)) получили широкое распространение благодаря появлению множества нелинейных и адаптивных подходов и систем управления, позволяющих расширить их эксплуатационные характеристики. Почти всегда в основе синтеза регуляторов данных систем управления лежат параметры ШД [1, 2]. Однако при различных условиях эксплуатации (воздействие температуры, механической нагрузки и т.д.) эти параметры могут меняться с течением времени [3, 4]. В связи с этим появляется необходимость определения параметров ШД во время его работы.

Алгоритмы идентификации на основе метода наименьших квадратов были успешно применены в синхронных двигателях с постоянными магнитами и асинхронных двигателях [5–8]. В работах [9, 10] представ-

лены алгоритмы идентификации и исследования влияния параметров ШД на критерий идентифицируемости.

В данной работе представлена методика идентификации параметров ГШД на основе метода наименьших квадратов при двух режимах управления – полношаговом и с дроблением шага 1/16.

Методика идентификации

Электрическая часть математической модели ГШД описывается следующими уравнениями [11]:

$$L \frac{di_a}{dt} = -Ri_a + p\psi\omega_m \cos(p\theta_m) + u_a, \quad (1)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = -Ri_b - p\psi\omega_m \sin(p\theta_m) + u_b, \quad (2)$$

где L – индуктивность обмотки; R – сопротивление обмотки; i_a, i_b – ток, протекающий в обмотках; u_a, u_b – напряжение обмоток; ψ – амплитуда потокоцепления; p – количество пар полюсов (для ГШД 34HS5435C-02B2 $p = 50$); ω_m – угловая скорость ротора двигателя; θ_m – угол поворота ротора двигателя.

Для формализации задачи идентификации электрических параметров ГШД выражения (1, 2) преобразуются к следующему виду:

$$\beta x_a(t) = y_a(t), \quad (3)$$

$$\beta x_b(t) = y_b(t), \quad (4)$$

где

$$\beta = (R \quad L \quad \psi), \quad (5)$$

$$x_a(t) = \begin{pmatrix} i_a(t) \\ \frac{di_a(t)}{dt} \\ e_a(t) \end{pmatrix}; \quad x_b(t) = \begin{pmatrix} i_b(t) \\ \frac{di_b(t)}{dt} \\ e_b(t) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$y_a(t) = u_a(t); \quad y_b(t) = u_b(t). \quad (7)$$

Выражения $e_a(t)$, $e_b(t)$ являются значениями обратной ЭДС, связанной с вращением ротора. Исходя из выражений (3, 4) $y(t)$ зависит

от $x(t)$. Вводится некоторая функция $F(x, \beta)$, которая определяется вектором неизвестных параметров β .

Ставится задача найти такой вектор параметров, который обеспечит минимальную совокупность погрешностей:

$$\min \|F(x, \beta) - y\|^2 = \min \sum_i (F(x_i, \beta) - y_i)^2, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Данная задача решается численными методами минимизации (например, функцией `lsqcurvefit` в MATLAB).

Методика эксперимента

В соответствии с предложенной методикой идентификации – нахождения вектора неизвестных параметров β – требуется измерение мгновенных значений напряжений и токов обмоток, а также угловой скорости ротора ГШД.

Для проведения эксперимента разработан стенд, схема которого представлена на рис. 1.

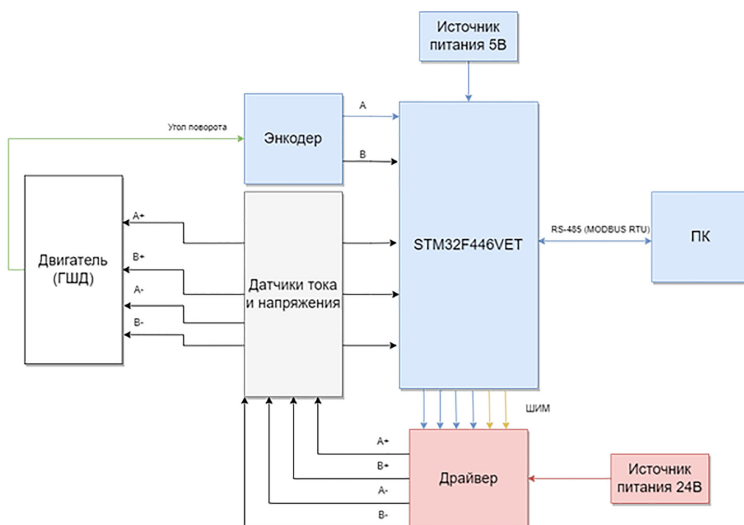


Рис. 1. Структурная схема стенда

За силовую часть отвечает драйвер, состоящий из двух h -мостов на основе полевых MOSFET транзисторов IRF3205 (максимальный пиковый ток – 55 А, максимальное напряжение сток-исток – 55 В) и микро-

схем L6384ED для их управления. Измерение тока проводится при помощи датчиков тока ACS712ELCTR-05B-T (погрешность измерений 1,5 %), измерение напряжения при помощи усилителей АМС1301 (погрешность измерений 0,3 %), измерение углового положения ротора при помощи инкрементального энкодера E40H12-2048-6-L-5 (разрешающая способность 2048 имп/об.). Формирование управляющих сигналов и сбор данных с датчиков обратной связи осуществляется при помощи микроконтроллера STM32F407VET.

Программное обеспечение для микроконтроллера выполняет функции управления ГШД и передачи данных, полученных с датчиков стенда на ПК [12]. В свою очередь программное обеспечение для ПК обеспечивает прием данных от микроконтроллера с возможностью их сохранения в файл для дальнейшей обработки.

Опыты проводились с попеременной коммутацией фаз на малой скорости до 30 шагов/с при двух режимах управления – при полношаговом и при дроблении шага 1/16. Измерялись следующие параметры: угловое положение, токи обмоток, напряжение обмотки А. Измерения всех величин проводились с частотой 10 кГц. Для подавления высокочастотных помех сигналы обрабатывались фильтром нижних частот с частотой среза 500 Гц.

Результаты эксперимента

Измеренные величины использовались для идентификации электрических параметров ГШД методом наименьших квадратов. Рассчитанные средние значения и стандартные отклонения для трех параллельных опытов при двух режимах работы ГШД в сравнении с его номинальными техническими характеристиками представлены в таблице.

Сравнительная характеристика полученных при идентификации значений параметров ГШД с номинальными значениями из технического паспорта двигателя

Параметр	Значение				
	Согласно техническим характеристикам	При измерении в полношаговом режиме		При измерении в режиме дробления шага 1/16	
		Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Сопrotивление R , Ом	1,6000	1,3533	0,0401	1,5578	0,0304
Индуктивность L , Гн	0,0220	0,0259	0,0013	0,0086	0,0011
Потокосцепление Ψ , Вб	0,0700	0,0569	0,0038	0,0716	0,0010

На рис. 2 представлено сравнение измеренного напряжения с напряжением, рассчитанным по формуле (6) на основе полученных в результате идентификации электрических параметров ГШД.

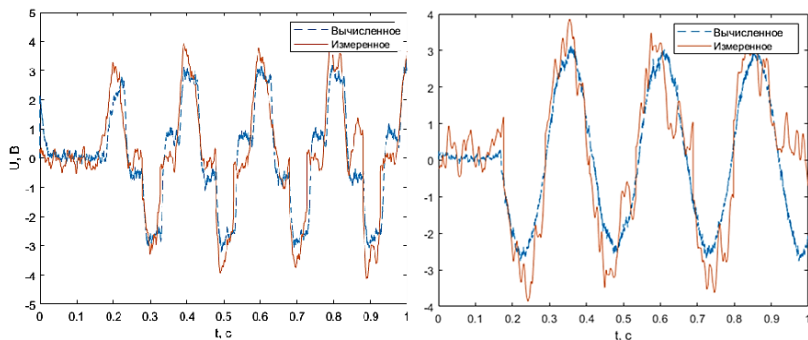


Рис. 2. Сравнение измеренного напряжения фазы А с рассчитанным: слева – полношаговый режим (угловая скорость 30 шаг/с), справа – режим дробления шага 1/16 (угловая скорость 25 шаг/с)

При валидации алгоритма обнаружено, что значение потокосцепления, полученное при идентификации в режиме дробления шага 1/16, практически соответствует значению, указанному в технических характеристиках ГШД, в полношаговом режиме – меньше указанного (относительная погрешность полношагового эксперимента $\delta = 15,42\%$, с дроблением шага 1/16 – $\delta = 2,29\%$). Сопротивление обмоток, полученное при полношаговом режиме, оказалось меньше указанного в технических характеристиках ($\delta = 15,42\%$), при режиме дробления шага 1/16 – сравнимым ($\delta = 3,13\%$). Индуктивность обмоток, полученная при полношаговом режиме, сравнима с техническими характеристиками ($\delta = 17,72\%$), при режиме дробления шага 1/16 существенно меньше.

Отклонение значения сопротивления, полученного при полношаговом режиме, от номинального можно обосновать тем, что при данном режиме индуктивность оказывает намного большее влияние на переходный процесс. Поэтому параметр сопротивления становится менее значимым при нахождении минимальной совокупности погрешностей [13]. С другой стороны, при увеличении дробления шага сопротивление обмоток начинает оказывать большее влияние, чем индуктивность, что показывают результаты идентификации, полученные при режиме дробления шага 1/16. Также полученные отклонения можно обосновать несовершенством стандартной математической модели ГШД, не учитывающей конструктивных особенностей двигателя [14].

Заключение

Разработана методика идентификации параметров ГЩД на основе метода наименьших квадратов. Были получены значения параметров электрической части (сопротивление, индуктивность обмоток, потокосцепление) при двух режимах управления – полношаговом и при дроблении шага 1/16.

Проведенные эксперименты по определению параметров шагового электропривода на основе представленной методики показали, что для определения сопротивления и потокосцепления более подходят измерения, полученные при режиме дробления шага, а для определения индуктивности – измерения, полученные при полношаговом режиме.

Представленный алгоритм идентификации позволяет уточнять известные по техническим характеристикам параметры шагового электропривода и получать неизвестные с целью настройки системы управления. Полученные параметры также могут быть использованы при диагностике шагового электропривода или при имитационном моделировании деградации параметров ГЩД с течением времени.

Список использованных источников и литературы

1. Nonlinear Gain Position Control Using Only Position Feedback for Permanent Magnet Stepper Motors / W. Kim, Y. Lee, D. Shin, C.C. Chung // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2021. – Vol. 36, no. 7. – Pp. 8506-8516. – DOI: 10.1109/TPEL.2020.3046849.
2. Voltage «Velocity – Torque» PI-PI Saturated Controller of High – Torque HSM / E. Ollervides, J. Saenz, A. Dzul, V. Santibanez // International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering. – 2014. – Pp. 158-162. – DOI: 10.1109/ICMEAE.2014.45.
3. Kim, W. Microstepping using a disturbance observer and a variable structure controller for permanent-magnet stepper motors / W. Kim, D. Shin, C.C. Chung // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60 (7). – Pp. 2689-2699. – DOI: 10.1109/TIE.2012.2198033.
4. Yang, S. Damping a hybrid stepping motor with estimated position and velocity / S. Yang, E. Kuo // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – Vol. 18 (3). – Pp. 880-887. – DOI: 10.1109/TPEL.2003.810836.
5. Sepe, R. Real-time adaptive control of the permanent magnet synchronous motor / R. Sepe, J. Lang // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1991. – Vol. 27. – Pp. 706-714. – DOI: 10.1109/28.85486.
6. Liu, K. A Novel Inertia Identification Method and Its Application in PI Controllers of PMSM Drives / K. Liu, C. Hou, W. Hua // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 13445-13454. –DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2894342.
7. Velez-Reyes, M. Decomposed algorithms for speed and parameter estimation in induction machines / M. Velez-Reyes, G. Verghese // Pmc. IFAC Nonlinear Control Systems Design Symp., Bordeaux, France. – 1992. – Pp. 156-161. – DOI: 10.1016/S1474-6670(17)52261-2.

8. *Liu, K.* Fast Determination of Moment of Inertia of Permanent Magnet Synchronous Machine Drives for Design of Speed Loop Regulator / K. Liu, Z. Zhu // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2017. – Vol. 25, no. 5. – Pp. 1816-1824. – DOI: 10.1109/TCST.2016.2615090.

9. *Blauch, J.* High-speed parameter estimation of stepper motors / J. Blauch, M. Bodson, J. Chiasson // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1993. – Vol. 1, no. 4. – Pp. 270-279. – DOI: 10.1109/87.260272.

10. *Никитин, Ю. Р.* Влияние параметров шагового двигателя на критерий идентифицируемости для нелинейной дискретной модели в пространстве состояний / Ю. Р. Никитин, П. В. Лекомцев, С. А. Трефилов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 52–59. – DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-52-59. – EDN GXEGBY.

11. *Ruilope, R. P.* Modelling and Control of Stepper Motors for High Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments. – 2014. – 223 p.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680740 // ПУЭ (Программа управления электроприводом) / Санников П. А. – Заявка № 2023680188. Дата поступления 03.10.2023г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.10.2023 г.

13. *Chirila, A.* On the model of a Hybrid Stepper Motor / A. Chirila, I. Deaconu, V. Navrapescu, M. Albu, C. Ghita // IEEE Intern. Conf. on Industrial Electronics. – 2008. – Pp. 496-501. – DOI: 10.1109/ISIE.2008.4677056.

14. *Уляшев, А. Э.* Математическая модель гибридного шагового двигателя / А. Э. Уляшев, А. Э. Старцев, П. С. Шичев // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 3. – С. 90–102.

P. A. Sannikov, postgraduate student

E-mail: pavelsannikov2000@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk


Identification of the Electrical Parameters of a Hybrid Stepper Motor under Various Control Modes

The article presents a method for identifying the electrical parameters of a hybrid stepper motor (KSHD) 34HS5435C-02B2 based on the least squares method. During the experiment, the values of the parameters of the electrical part of the GSHD mathematical model (resistance, inductance of windings, flow coupling) were obtained in two control modes – with full-step and with crushing step 1/16. The comparison of the obtained parameters with the nominal characteristics of the studied GSHD declared by the manufacturer is carried out. The relative errors in the full-step mode and in the crushing mode of step 1/16 in determining the flow coupling were 15.42% and 2.29%, in determining the resistance of the windings - 15.42% and 3.13%, in determining the inductance of the windings - 17.72% and 60.91%, respectively.

Keywords: hybrid stepper motor, identification, least squares method.

УДК 621.3.072.8(045)

А. Е. Фокеев, канд. техн. наук, доц.

И. А. Бегишев , магистрант

E-mail: begishev_2015@mail.ru

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

Подход к созданию цифрового двойника установки компенсации реактивной мощности

В работе описан подход к созданию цифрового двойника установки компенсации реактивной мощности (УКРМ). Выполнен анализ применимости математических моделей основных компонентов УКРМ для создания цифрового двойника УКРМ.

Ключевые слова: модель надежности, конденсатор, контактор, дроссель, установка компенсации реактивной мощности, цифровой двойник.

Введение

Сокращению затрат на обслуживание электроустановок и внедрению процедур ремонта по фактическому техническому состоянию электрооборудования препятствуют следующие проблемы:

1. Недостаточная точность и надежность в определении фактического технического состояния электроустановок – это приводит к неправильной оценке необходимости ремонта или замены компонентов.

2. Отсутствие или высокая стоимость систем мониторинга и диагностики – без соответствующей системы мониторинга и диагностики электрооборудования невозможно определить степень износа, предупредить аварийный выход оборудования из строя и определить оптимальное время для проведения ремонта.

Вышеуказанные проблемы активно начинают решаться с помощью методов предсказательного обслуживания. Одним из способов реализации предсказательного обслуживания является создание цифровых двойников электрооборудования. Цифровые двойники представляют собой математические модели, параметры которых актуализируются посредством получения результатов измерения. Математические модели, применяемые в цифровых двойниках, могут соответствовать схемам замещения электрооборудования и моделям надежности.

Целью исследования является анализ применимости существующих математических моделей основного электрооборудования установки компенсации реактивной мощности (УКРМ) для формирования подхода к созданию цифрового двойника УКРМ.

Анализ применимости моделей оборудования для создания цифрового двойника УКРМ

Система управления установкой компенсации реактивной мощности использует следующие параметры для определения оптимального уровня компенсации и поддержания устойчивого электрического режима в сети:

- напряжение;
- ток;
- реактивная мощность;
- температура в корпусе УКРМ;
- уровень гармоник.

Для автоматического отслеживания параметров на каждой ступени УКРМ используется контроллер. К примеру, контроллер для компенсации реактивной мощности DCRJ12RU. Параметры, измеряемые контроллерами согласно руководству по эксплуатации (таблица).

Параметры контроллеров DCRK и DCRJ

Измерения	DCRK	DCRJ
Немедленное измерение коэффициента мощности ($\cos \phi$)	+	+
Напряжение	+	+
Ток	+	+
Полная реактивная мощность	+	+
Температура в корпусе УКРМ	+	+
Анализ гармоник тока	-	+
Анализ гармоник напряжения	-	+

Для создания цифрового двойника установки компенсации реактивной мощности по моделям, перечисленным в стандартах и научных работах [1–3], нужны следующие входные величины:

- среднеквадратичное значение напряжения на зажимах конденсатора (в электрической сети), В;
- гармонические составляющие тока через конденсатор (в электрической сети) до 40-го порядка, А;
- температура обмоток дросселя, °С;
- температура конденсатора, °С.

Сравнивая необходимые входные величины для создания цифрового двойника и описание контроллера, можно заметить, что для измерения температуры конденсатора и обмоток дросселя контроллером необходимо создать отдельные каналы связи для каждого компонента УКРМ, что усложнит конструкцию и приведет к удорожанию УКРМ. Для более простого решения этого вопроса возможно применить расчетный метод.

Для расчета гармонических составляющих тока, температуры самонагрева и температуры конденсатора может применяться метод, который приведен в [4]. Схожим образом можно определять и температуру самонагрева и температуру дросселя.

Температура дросселя может быть определена по выражению

$$T_L = T_a + dT_L, \quad (1)$$

где T_a – температура окружающей среды; dT_L – температура самонагрева дросселя.

В качестве технических характеристик дросселя используются: C_L – собственная емкость дросселя – емкость, возникающая между отдельными витками катушки, Пф [5]; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Собственная емкость дросселя определяется по выражению

$$C_L = \pi \cdot D_{\text{cp}} \cdot (8,5\varepsilon + 8,2) \cdot 10^{-1}, \quad (2)$$

где D_{cp} – средний диаметр катушки, см; ε – диэлектрическая проницаемость изоляции провода катушки.

Значение тока гармонической составляющей через дроссель, А:

$$I_{Lh} = \frac{U_h}{\sqrt{ESR^2 + \left(2\pi f_h L_{\text{ref}} - \frac{1}{2\pi f_h C_{\text{ref}}}\right)^2}}, \quad (3)$$

где U_h – измеренное напряжение гармонической составляющей в точке подключения УКРМ, В; h – номер гармоники; f_h – частота гармонической составляющей, Гц; L_{ref} – номинальная индуктивность катушки, Гн; C_{ref} – номинальная емкость конденсатора, Ф; ESR – эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, Ом [6].

Реактивная мощность гармонической составляющей дросселя, ВАр:

$$Q_{Lh} = I_{Lh} U_h. \quad (4)$$

Мощность диэлектрических потерь с учетом влияния высших гармонических составляющих дросселя, Вт:

$$P_{DL} = \sum_{h=2}^n Q_{Lh} \operatorname{tg} \delta. \quad (5)$$

Величина последовательного сопротивления потерь в собственной емкости дросселя, Ом [5]:

$$R_{CL} = \omega^3 \cdot L^2 \cdot C_L \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (6)$$

где C_L – собственная емкость дросселя, Пф; L – индуктивность дросселя, Гн; ω – частота переменного тока, протекающего через дроссель, рад/с.

Резистивные потери в дросселе с учетом влияния высших гармонических составляющих, Вт:

$$P_{IL} = P_L + \sum_{h=2}^n I_{Lh}^2 \cdot R_{CL}, \quad (7)$$

где потери в сердечнике на единицу объема, Вт:

$$P_L = \frac{1}{lA} \cdot Q_{Lh}, \quad (8)$$

где l – длина сердечника; A – площадь поперечного сечения сердечника.

Суммарные потери в дросселе с учетом влияния высших гармонических составляющих, Вт:

$$P_{SL} = P_{DL} + P_{IL}. \quad (9)$$

Увеличение температуры дросселя с учетом влияния высших гармонических составляющих, °С:

$$dT_L = P_{SL} R_{Lth}, \quad (10)$$

где R_{Lth} – тепловое сопротивление дросселя, $\frac{\text{град}}{\text{Вт}}$ [7].

В составе УКРМ и установки компенсации реактивной мощности с фильтрами (УКРМФ) может быть $n = 1 \dots i$ ступеней. Это значит, что для каждой i -й ступени компенсации реактивной мощности отклонение емкости конденсатора dC и индуктивности дросселя dL от номинального значения может быть определено только в момент включения этой ступени.

Отклонение емкости от номинального значения, %:

$$C = \frac{I_{Ch}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_h}; \quad (11)$$

$$dC = \frac{C_{ref} - C}{C_{ref}}. \quad (12)$$

Отклонение индуктивности от номинального значения, %:

$$L = \frac{U_L}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{Lh}}; \quad (13)$$

$$dL = \frac{L_{ref} - L}{L_{ref}}. \quad (14)$$

На рисунке ниже приведена предлагаемая структура цифрового двойника УКРМ [8]. Исходными данными (константами) цифрового двойника УКРМ являются:

C_{ref} – номинальная емкость конденсатора, мкФ;

L_{ref} – номинальная индуктивность дросселя, Гн;

U_L – номинальное напряжение дросселя, В;

U_K – номинальное напряжение контактора, В;

U_C – номинальное напряжение конденсатора, В;

$t_{sl.ref}$ – значение срока службы при номинальных условиях эксплуатации, ч.

Входящими данными цифрового двойника являются:

U_{RMS} – среднеквадратичное значение напряжения (в электрической сети), В;

$U_{h1}, U_{h2}, U_{h3}, \dots, U_{hn}$ – гармонические составляющие напряжения на устройстве (в электрической сети), В;

$I_{h1}, I_{h2}, I_{h3}, \dots, I_{hn}$ – гармонические составляющие тока устройства (в электрической сети), В;

T_a – температура воздуха окружающей среды, °С.

Промежуточными данными цифрового двойника являются:

dT_C – температура самонагрева конденсатора;

dT_L – температура самонагрева дросселя;

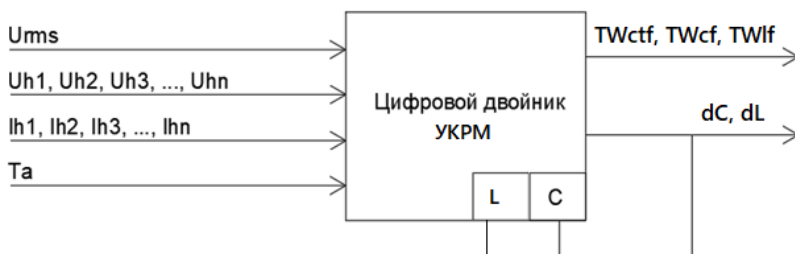
N_v и N_t – перерасчетные коэффициенты [1].

Выходными данными цифрового двойника являются:

TWf – значение выработки срока службы нарастающим итогом с момента включения в работу;

dC – отклонение емкости конденсатора от номинального значения;

dL – отклонение индуктивности дросселя от номинального значения.



Структура цифрового двойника УКРМ

Выводы

1. Анализ существующих математических моделей основного электрооборудования УКРМ и их сопоставление с составом данных, получаемых контроллерами УКРМ, показал, что реализация цифрового двойника УКРМ возможна без усложнения конструкции УКРМ.

2. Определен порядок расчета температуры самонагрева дросселя для реализации математической модели надежности дросселя в составе цифрового двойника УКРМ.

3. Предложен подход к созданию цифрового двойника УКРМ, состоящего из математических моделей надежности конденсаторов, контакторов и дросселей.

Список использованных источников и литературы

1. BS EN 61709:2011. Electric components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion / CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization – 2011. – 94 p. – ICS 31.020

2. Tyrone, L. Jones. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment / Tyrone L. Jones. – West Bethesda. CARDEROCKDIV, NSWC-11. – 2011. – 522 p.

3. Артюхова, М. А. Расчет надежности электромагнитных контакторов / М. А. Артюхова, К. А. Богачев // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. НИУ ВШЭ. – 2014. – 8 с. – URL: <https://publications.hse.ru/pubs/share/folder/ywqwina7da/138922824.pdf> (дата обращения: 10.11.2023).

4. *Фокеев, А. Е.* Анализ режимов работы косинусных самовосстанавливающихся металлоплёночных конденсаторов напряжением до 1000 В / А. Е. Фокеев, Д. В. Ушаков // Научный вестник НГТУ. – 2020. – С. 35–42. – EDN IKNBTS


5. *Петров, К. С.* Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. – Москва, 2003. – 505 с.

6. *Боровиков, С. М.* Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян. – Минск : БГУИР, 2010. – 71 с.

7. *Ковалев, В. Г.* Методические указания по расчету параметров цилиндрической катушки индуктивности. – Чебоксары : ЧГУ имени И. Н. Ульянова, 2019. – 35 с.

8. *Фокеев, А. Е.* Цифровой двойник металлоплёночного косинусного конденсатора / А. Е. Фокеев, Е. В. Баймурзин // Выставка инноваций – 2023. – Ижевск : ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2023. – С. 3–17. – EDN KCHIPU

A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor

I. A. Begishev , master student

E-mail: begishev_2015@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Approach to Creating a Digital Twin of a Teactive Power Compensation Installation

The paper describes an approach to creating a digital twin of a reactive power compensation installation (RPC). An analysis has been made of the applicability of mathematical models of the main components of the UKRM for creating a digital twin of the UKRM.

Keywords: reliability model, capacitor, contactor, inductor, reactive power compensation installation, digital twin.

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

УДК 620.179.17

Т. С. Абрамова^а✉, аспирант

С. П. Шляхтенков^б✉, аспирант

А. А. Янин^в✉, вед. инженер лаборатории аддитивных технологий
E-mail: t.abramova_sgups@mail.ru^а✉, shlyakhtenkow@gmail.com^б✉,
yanin@stu.ru^в✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск

Акустическая эмиссия при механических испытаниях пластиковых образцов, изготовленных методом послойного наплавления

В статье рассматривается использование метода акустической эмиссии для контроля качества плоских образцов пластика, изготовленных с помощью аддитивных технологий. В ходе исследования анализируются потоковые характеристики акустических сигналов, возникающих при разрушении образцов. Исследуется взаимосвязь между параметрами акустической эмиссии и механическими свойствами образцов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, пластик, образец, акустическая эмиссия, ABS, PLA, растяжение.

Введение

Аддитивные технологии являются одним из основных направлений развития единичного и мелкосерийного производства трехмерных изделий [1]. Печать на 3D-принтерах стала популярной благодаря своей экономичности и возможности оперативно создавать изделия сложной геометрической формы. По мере расширения области применения аддитивных технологий специалисты сталкиваются с новыми типами дефектов, которые возникают при печати. В основном это неоднородность печати, несплавления, слабая адгезия между слоями. Эти дефекты ока-

зывают значительное влияние на прочность детали, что в последующем может привести к разрушению, отказу или аварии. Встает необходимость в осуществлении контроля готовой продукции после печати.

Традиционные методы неразрушающего контроля, например ультразвуковой, недостаточно эффективны при контроле пластиковых деталей. В пластиковых изделиях при нагружении могут появляться мало-значительные дефекты, которые необходимо распознать на начальной стадии развития [2]. В решении этой задачи хорошо себя зарекомендовал метод акустической эмиссии. Этот метод основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в материале при его деформировании или разрушении. Акустическая эмиссия нашла широкое применение при контроле объектов железнодорожной отрасли [3, 4]. В последнее время метод акустической эмиссии применяют для контроля объектов из композиционного материала и металлических изделий аддитивного производства [5, 6].

Целью работы является исследование параметров акустической эмиссии при механических испытаниях образцов пластика. Исследование направлено на определение характеристик акустических сигналов, их связи с механическими свойствами образцов, а также особенности процессов деформации и разрушения с учетом структуры и свойств материала.

Материалы и оборудование

Для исследования параметров акустической эмиссии на 3D-принтере напечатаны плоские образцы из следующих материалов: PLA и ABS по ГОСТ 33366.1–2015. Технические характеристики ABS и PLA представлены в таблице.

Технические характеристики пластиков ABS и PLA

Технические характеристики	ABS	PLA
Предел прочности, МПа	35–37	58–60
Модуль упругости, ГПа	2,5–2,6	3,7–3,8
Температура плавления, °С	160–190	210–240
Температура 3D-печати, °С	190–220	230–250

Рабочая длина образцов составляла 100 мм, площадь поперечного сечения $A = 16 \text{ мм}^2$. Образцы напечатаны методом послойного наплавления пластика по концентрическому шаблону со 100% заполнением. Концентрический шаблон представляет собой внутреннюю структуру, состоящую из концентрических линий, которые соответствуют контуру детали. В середине каждого образца сверлом проделано отверстие диа-

метром 1 мм для создания искусственного концентратора напряжения (рис. 1).

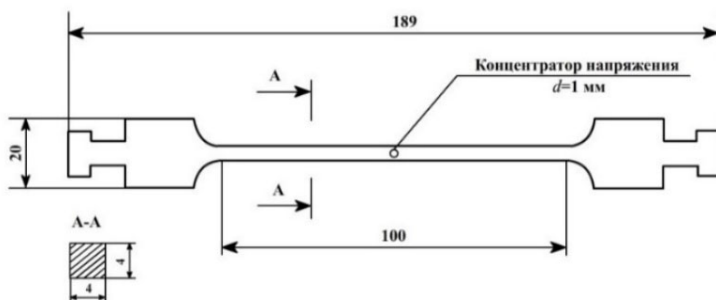


Рис. 1. Модель плоского образца

Растяжение образцов до разрушения проводилось на установке МИ-40КУ с постоянной скоростью 5 мм/мин. Регистрация АЭ-сигналов выполнялась системой СЦАД 16.03 производства СГУПС. На пластиковые образцы с помощью клейкой ленты устанавливались широкополосные пьезоэлектрические датчики GT200, полоса пропускания которых от 130 до 200 кГц, датчики подключались к системе через усилители 100 дБ. При испытаниях коэффициент усиления составлял 65 дБ, порог селекции 5 мкВ, частота дискретизации 2 МГц. В качестве контактной среды использовался вазелин (рис. 2).

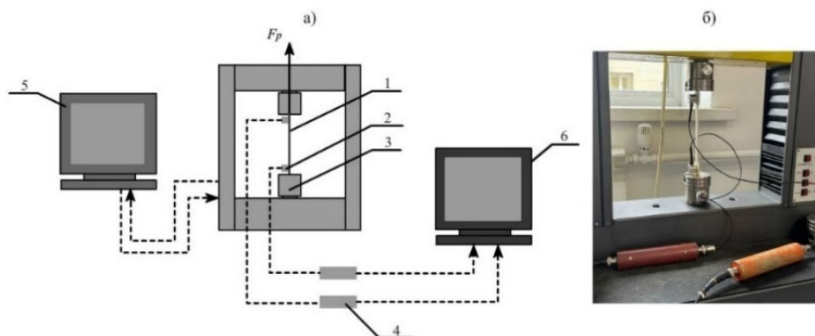


Рис. 2. Схема испытательной установки: а – схема установки: 1 – испытательный образец, 2 – широкополосные пьезоэлектрические датчики GT200, 3 – захватывающее устройство, 4 – усилитель 100 дБ, 5 – персональный компьютер с программным обеспечением для МИ-40КУ, 6 – система СЦАД 16.03 производства ФГБОУ ВО «СГУПС»; б – фотография установленного образца

Анализ экспериментальных результатов

При растяжении образцов с концентратором напряжения системой СЦАД 16.03 регистрировались сигналы (рис. 3).

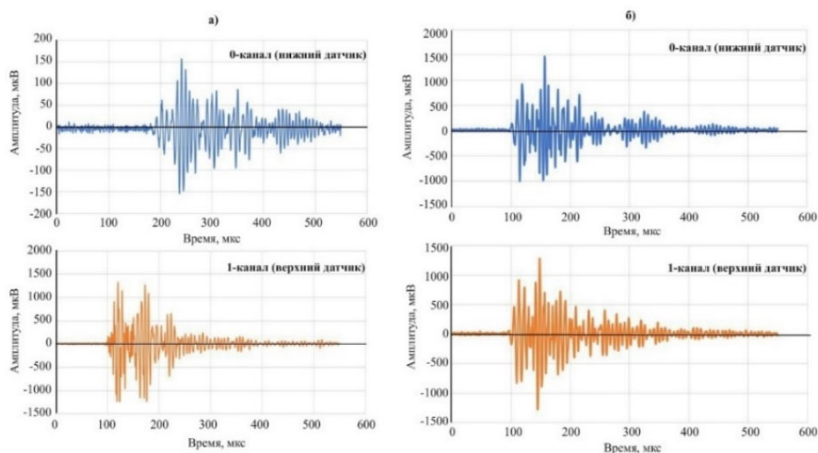


Рис. 3. Характерные сигналы: *а* – сигнал, зарегистрированный в верхнем захвате; *б* – сигнал, зарегистрированный в центре

Для PLA-пластика зарегистрировано 183 сигнала, у ABS-пластика зарегистрировано 63 сигнала. Они регистрировались не только в центральной части образца, но и в захватах (рис. 3). С целью выделения из общего числа записанных сигналов только тех, которые были записаны в центре, был использован метод сортировки по разнице времени прихода (РВП). Если РВП равняется нулю (см. рис. 3, б) или меньше 50 мкс, это значит, что источник сигнала расположен в центре исследуемого образца. Сигналы, которые фиксировал лишь один из датчиков или РВП превышает 50 мкс, относятся к сигналам, поступающим из захватов (рис. 3, а). После применения сортировки выявлено, что из центра образца пластика PLA и ABS зарегистрировано 39 и 6 сигналов соответственно.

Параметры АЭ-контроля и механических характеристик пластика PLA и ABS представлены на рис. 4.

У PLA-пластика регистрация первых сигналов начинается в зоне упругих деформаций. Активность сигналов резко возрастает в момент перехода от упругой деформации к пластическому течению. Максимум активности достигается перед разрушением образца, когда напряжения

в образце приближаются к пределу прочности. На участке деформационного упрочнения наблюдается уменьшение регистрируемых сигналов АЭ.

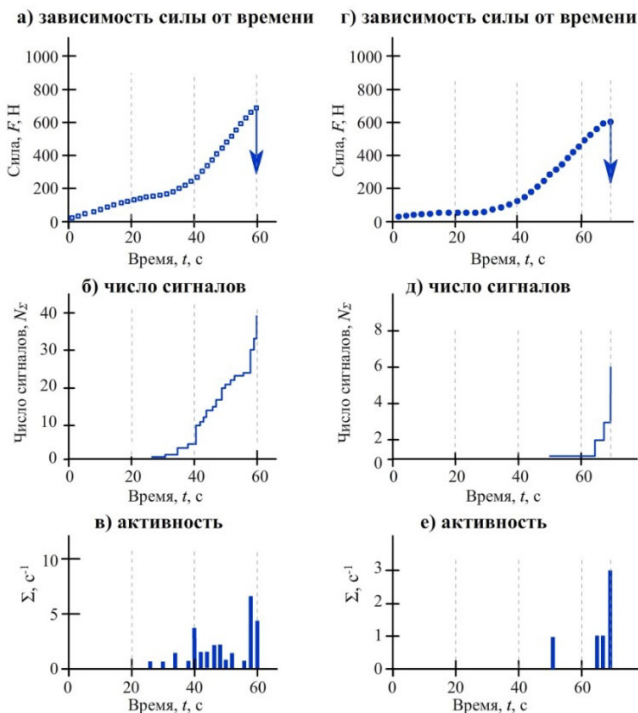


Рис. 4. Параметры АЭ-контроля пластика: а – зависимость силы от времени для PLA; б – число сигналов для PLA; в – активность для PLA; г – зависимость силы от времени для ABS; д – число сигналов для ABS; е – активность для ABS

В отличие от PLA-пластика у ABS-пластика количество зарегистрированных сигналов при растяжении образца в 6,5 раз меньше. Это может быть обусловлено структурой ABS-пластика, поскольку данный вид пластика менее эластичен, чем PLA. Сигналы в ABS-пластике регистрировались непосредственно перед разрушением образца.

Закключение и основные выводы

В процессе испытаний регистрировались акустические сигналы, которые возникали в результате деформации образцов. Перед разрушением активность сигналов резко увеличилась у PLA-пластика в 8 раз,

у ABS-пластика в 2 раза. Это позволяет обнаружить предразрушающее состояние за 4 с до разрушения образца.

Метод акустической эмиссии перспективен для создания методик мониторинга процесса деформации и разрушения не только образцов, изготовленных методом послойного наплавления, но и объектов.

Список использованных источников и литературы

1. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство / О. Н. Гончарова, Ю. М. Бережной, Е. Н. Бессарабов, Е. А. Кадамов, Т. М. Гайнутдинов, Е. М. Негопетьян, В. М. Ковина // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журн. – 2016. – № 4. – <ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3931>.
2. *Wu, H.* Experimental study of the process failure diagnosis in additive manufacturing based on acoustic emission / H. Wu, Z. Yu, Y. Wang // Measurement. – 2018. – Vol. 136. – Pp. 445-453. – DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.067.
3. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии : монография / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2004. – 368 с. – ISBN 5-217-03234-0. – EDN QNRJGX.
4. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / В. В. Ивлиев, С. И. Кабанов, С. А. Бехер [и др.] ; под ред. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьезнова. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с. – ISBN 978-5-02-018973-7. – EDN QNXOFX.
5. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, А. Е. Кареев [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 34–41. – EDN PBDRVH.
6. *Ковалевич, А. С.* Экспериментальное исследование параметров акустической эмиссии при циклических испытаниях металлических изделий аддитивного производства / А. С. Ковалевич, И. Ю. Кинжагулов, К. А. Степанова // Политранспортные системы : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 12–13 нояб. 2020 г.). – Новосибирск, 2020. – С. 530–531.

T. S. Abramova^a✉, postgraduate student

S. P. Shlyakhtenkow^b✉, postgraduate student

A. A. Yanin^c✉, the leading engineer of the laboratory of additive technologies

E-mail: *t.abramova_sgups@mail.ru*^a✉, *shlyakhtenkow@gmail.com*^b✉,
yanin@stu.ru^c✉

Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk

Acoustic Emission During Mechanical Testing of Plastic Samples Made by Layer-by-Layer Deposition

The article discusses the use of the acoustic emission method for quality control of flat plastic samples made using additive technologies. In the course of the study, the flow characteristics of acoustic signals arising from the destruction of samples are analyzed. The relationship between the acoustic emission parameters and the mechanical properties of the samples is investigated.

Keywords: additive technologies, plastic, sample, acoustic emission, ABS, PLA, stretching.

УДК 620.179.16

К. Ю. Белослудцев, магистрант

E-mail: kostya.belka99@yandex.ru

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

Использование метода главных компонент для раздельного определения глубины и размера дефекта акустическим методом

В работе представлено обоснование использования метода главных компонент для определения характеристик (глубина и диаметр) дефекта. Получены уравнения регрессии, с помощью которых по известным параметрам сигнала дефектов определяются характеристики дефектов. Представлены результаты обучения программы и результаты проверки метода.

Ключевые слова: акустический зеркально-теневого метод, статистические параметры, дефекты, метод главных компонент.

Введение

В большинстве случаев при неразрушающем контроле при выявлении дефектов используют информативные параметры регистрируемых сигналов, что не позволяет определить характеристики дефектов. С развитием технологий предлагается использование методики машинного обучения для обработки многопараметровых данных. В работах [1–3] представлены методики использования машинного обучения для обработки результатов измерений.

Ультразвуковые (акустические) эхо-методы неразрушающего контроля (НК) при оценке дефекта, как правило, используют в качестве основного информативный параметр амплитуды сигнала, при этом критерием браковки является превышение амплитудой сигнала заранее заданного браковочного уровня. Дополнительным параметром акустического эхо-метода является время прихода эхо-импульса от дефекта, пропорциональное его глубине залегания.

© Белослудцев К. Ю., 2024

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).

В случае использования зеркально-теневого метода акустического контроля информативным параметром является амплитуда сигнала, отраженного от противоположной поверхности объекта. При этом критерием браковки является уменьшение амплитуды донного сигнала, обусловленного прохождением волны через область с дефектом, характеризуемым коэффициентом выявляемости дефекта. Ограничением указанного метода является невозможность определения координаты дефекта и его эквивалентной площади.

Цель данной работы – обоснование использования метода главных компонент для определения характеристик дефектов по параметрам сигнала дефекта.

Материалы и методы

Результатом зеркально-теневого метода НК на многократных отражениях являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. Наличие дефекта в зоне контроля приводит к ослаблению сигнала многократных отражений.

В работе [4] представлено описание и применение метода главных компонент для анализа параметров сигнала (математическое ожидание M_n , дисперсия D_n , среднее квадратическое отклонение σ_n , асимметрия S_n , эксцесс E_n и многократный коэффициент выявляемости K_s) для расчета обобщенного параметра дефекта.

На ослабление сигнала влияют глубина залегания и диаметр дефекта. Дабы учесть влияние обоих параметров, введем понятие обобщенной характеристики дефекта G , определяемой произведением диаметра плоскодонного отверстия (ПДО) d и глубины ПДО h :

$$G = dh. \quad (1)$$

Чтобы отстроиться от радиуса объекта контроля, пронормируем на квадрат радиуса объекта контроля r :

$$G_n = h_n d_n = \frac{h}{r} \cdot \frac{d}{r} = \frac{dh}{r^2}. \quad (2)$$

Для получения предварительной выборки для обучения и проверки метода были изготовлены стандартные образцы предприятия (СОП) с плоскодонными отверстиями (ПДО) с различными диаметрами и глубинами. В общей выборке искусственных было представлено 38 дефектов, из которых 33 использовались для обучения программы и 5 в качестве проверочной выборки.

Полученные параметры сигналов дефектов и их обобщенные характеристики позволяют с помощью метода главных компонент построить регрессионное уравнение обобщенной нормированной характеристики G_n от параметров сигнала. Преобразуем выражение (2) и получим обобщенную нормированную характеристику глубины h_n :

$$h_n = \frac{h}{r}. \quad (3)$$

Проведем обучение для данной характеристики и получим регрессионное уравнение обобщенной нормированной глубины h_n от параметров сигнала. Преобразовав выражение (2), получится высчитать диаметр дефекта:

$$d = \frac{G_n}{h_n} \cdot r. \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

В результате обучения программы на искусственных дефектах были получены регрессионные уравнения для h_n и G_n :

$$Y_G = -0,0398 \cdot X_1 - 0,0267 \cdot X_2 + 0,0588 \cdot X_3 - 0,2223 \cdot X_4 + 0,0168 \cdot X_5 + 0,1211 \cdot X_6 + 0,1535; \quad (5)$$

$$Y_G = -0,09 \cdot X_1 + 0,0336 \cdot X_2 + 0,0722 \cdot X_3 - 0,4643 \cdot X_4 - 0,1572 \cdot X_5 + 0,1489 \cdot X_6 + 0,5652. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены зависимости параметров Y_G и Y_h по методу главных компонент от обобщенных характеристик дефекта h_n и G_n по результатам геометрических измерений.

На рис. 2 представлен результат проверки программы на проверочной выборке, где $h_{\text{расч}}$ и $d_{\text{расч}}$ – рассчитанные программой глубина и диаметр дефекта. Наблюдаем высокий уровень достоверности аппроксимации, которая для глубины равна 0,5436, а для диаметра 0,901.

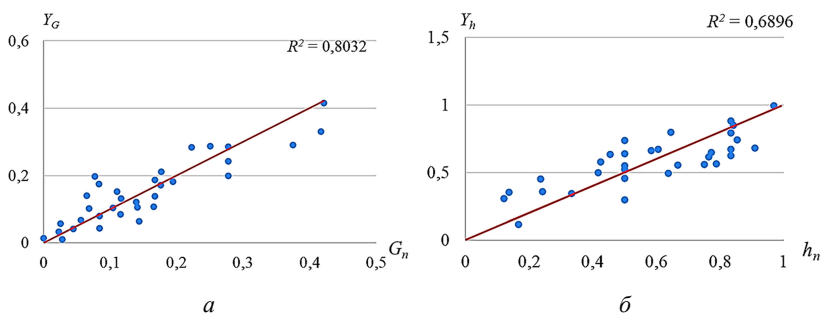


Рис. 1. Результат обучения по методу главных компонент для обобщенной характеристики (a) и обобщенной глубины (\bar{b})

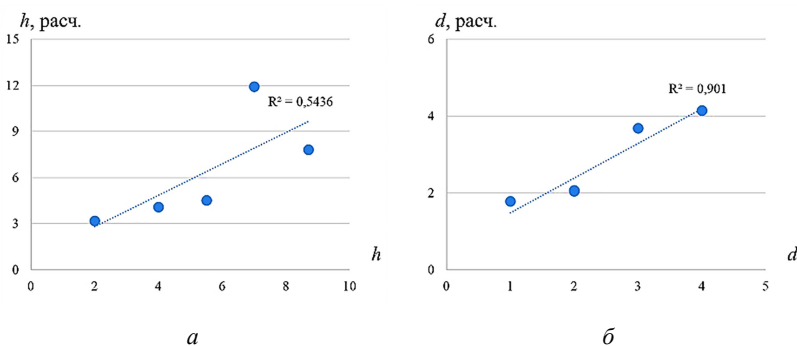


Рис. 2. Результат проверки методики на проверочной выборке для глубины (a) и диаметра (\bar{b}) дефекта

Выводы

Приведено использование метода главных компонент для определения характеристик дефекта по параметрам осциллограмм.

Получены регрессионные уравнения, с помощью которых рассчитаны характеристики дефектов из проверочной выборки, получены высокие значения достоверности аппроксимации.

Список использованных источников и литературы

1. Вдовин, К. Н. Отображение взаимосвязи параметров магнитного неразрушающего контроля и механических свойств автомобильной стали 08Пс с применением парного и множественного регрессионного анализа / К. Н. Вдовин, А. В. Маркевич // Технология металлов. – 2019. – № 4. – С. 40–46. – DOI: 10.31044/1684-2499-2019-4-0-40-46. – EDN ZDMRZJ.

2. Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов [и др.] // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – № 4. – С. 93–110. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110. – EDN DRWVUU.

3. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле металлических материалов с диэлектрическими покрытиями / А. В. Егоров, В. В. Поляков, Я. И. Грачева [и др.] // *Известия Алтайского государственного университета*. – 2017. – Т. 96, № 4. – С. 33–38. – DOI: 10.14258/izvasu (2017)4-05. – EDN ZQJTVT.

4. Метод главных компонент при обработке многопараметровых акустических сигналов зеркально-теневого метода контроля проката / О. В. Муравьева, В. А. Тенев, А. Ф. Брестер [и др.] // *Автометрия*. – 2023. – Т. 59, № 5. – С. 1–12.

K. Yu. Belosludcev, master student

E-mail: kostya.belka99@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Using the Principal Component Method for Separate Determination of the Depth and Size of the Defect by Acoustic Method

The paper presents the rationale for using the principal component method to determine the characteristics (depth and diameter) of the defect. Regression equations are obtained with the help of which, according to the known parameters of the defect signal, the characteristics of defects are determined. The results of the training program and the results of the method verification are presented.

Keywords: acoustic mirror-shadow method, statistical parameters, defects, principal component method.

УДК 534.6.08

А. В. Блинова [✉], аспирант

Л. А. Денисов, магистрант

E-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

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

Выявление дефектов листов терморасширенного графита акустическим методом

В данной работе представлены результаты изменения амплитуды акустического сигнала звуковой частоты, прошедшего через образцы листов терморасширенного графита без дефектов относительно амплитуды акустического сигнала для тех же образцов и точек измерения, но с искусственно созданными дефектами в виде сквозных отверстий известных диаметров. Исследовано влияние размера дефектов на отклонение амплитуды непосредственно над дефектом, а также в области радиусом 5 см относительно дефекта. Оценено влияние плотности листов одинаковой толщины на изменение амплитуды акустического сигнала.

Ключевые слова: терморасширенный графит, амплитудно-теневой метод, измерение, лист, акустический сигнал, дефект.

Введение

Терморасширенный графит (ТРГ) – материал, представляющий собой по химическому составу чистый углерод с небольшим добавлением примесей [1]. В процессе получения ТРГ не только сохраняет все ценные свойства графита, но и приобретает новые: такие, как низкая плотность и способность к формованию (прокатке, прессованию) без добавления связующего. ТРГ является перспективным материалом для изготовления композиционных материалов из-за его высокой электропроводности, низкой плотности и стоимости [2]. Фольга ТРГ, полученная прессованием и прокаткой вспученного графита, представляет собой эффективный материал для изготовления термостойких прокладок, уплотнений и набивок [3].

© Блинова А. В., Денисов Л. А., 2024

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

Изделия из ТРГ применяются во многих областях промышленности на опасных производственных объектах, поэтому требуется проводить контроль свойств изделий и наличия дефектов на стадии производства.

Целью работы является оценка возможности выявления дефектов листов терморасширенного графита акустическим методом для определения качества выпускаемой продукции материалов из терморасширенного графита.

Используемый подход

Выявление дефектов листов ТРГ проводилось с помощью установки бесконтактного акустического метода контроля [4], блок-схема которой представлена на рис. 1, а.

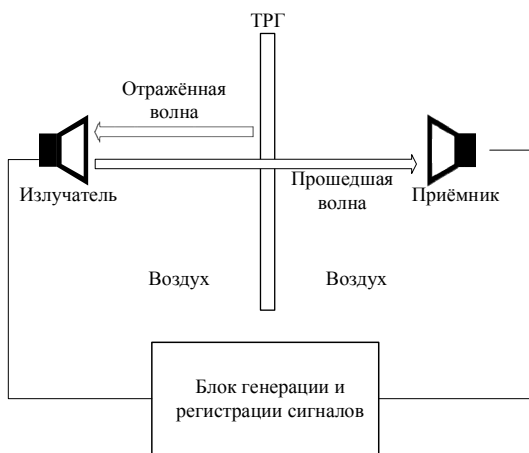


Рис. 1. Реализация бесконтактного акустического метода контроля листов из терморасширенного графита

Согласно приведенной блок-схеме (рис. 1), сигнал частотой 7,5 кГц формируется блоком генерации, имеющим возможность выбора амплитуды, что позволяет проводить контроль различных по толщине и плотности листов ТРГ. Электрический сигнал с блока преобразуется в звуковую волну высокочастотным излучателем W-06A ($D = 40$ мм), прошедшее излучение фиксируется идентичным приёмником, после чего сигнал оцифровывается и на экран блока генерации и регистрации сигналов выводится его амплитуда в относительных единицах.

Проводился расчет изменения амплитуды ΔU прошедшего сигнала сквозь дефектный лист ТРГ U_d [отн. ед.] от амплитуды прошедшего сигнала U_{HO} сквозь настроечный образец (НО) по формуле

$$\Delta U = \left| \frac{U_{HO} - U_d}{U_{HO}} \right| \cdot 100\%. \quad (1)$$

Настроечный образец (НО) – это бездефектный лист ТРГ, идентичный каждому исследуемому образцу с известной плотностью и толщиной.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В качестве объекта контроля использовались образцы из ТРГ размером 300×300 мм, плотностью $643\text{--}1147$ кг/м³, толщиной 1,5 мм, изготовленные на предприятии ООО «СИЛУР». В качестве дефектов исследовались тонкие сквозные отверстия, полученные путем прокалывания металлическим стержнем диаметром 0,40 и 0,62 мм. Получен график зависимости изменения амплитуды от положения излучателя-приемника относительно сквозного отверстия для листа ТРГ плотностью 1147 кг/м³ (рис. 2).

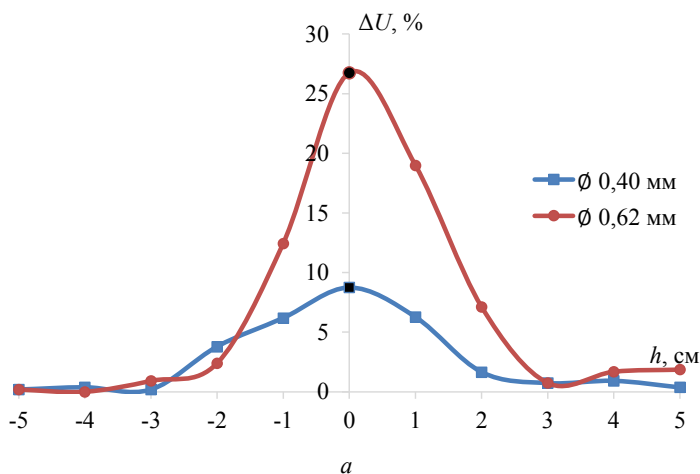


Рис. 2. Результаты эксперимента: график зависимости изменения амплитуды от положения излучателя-приемника относительно сквозного отверстия для листа ТРГ (a)

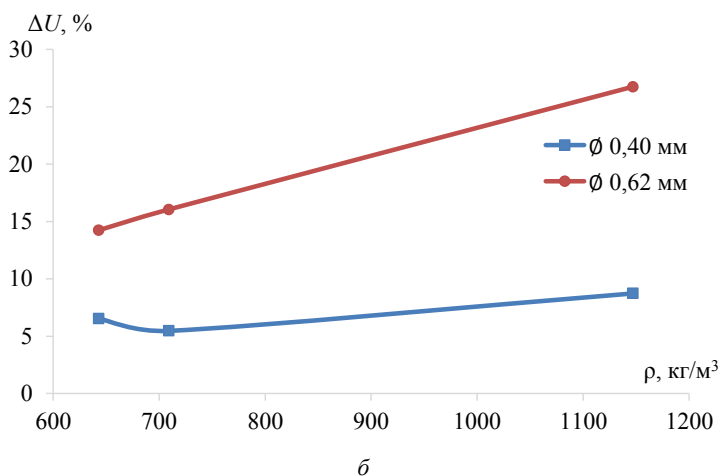


Рис. 2 (окончание, начало на с. 109): график зависимости изменения амплитуды от плотности листов ТРГ (б)

Максимальное изменение амплитуды достигает 27 % при наличии сквозного отверстия диаметром 0,62 мм на листе ТРГ. Чувствительность выявления дефектов гораздо выше для отверстий большего диаметра. В процессе удаления отверстия от акустической оси излучателя-приемника изменение амплитуды уменьшается. Также выявлено, что при увеличении плотности листа ТРГ изменение амплитуды прошедшего сигнала сквозь лист ТРГ увеличивается (рис. 2, б).

Выводы

Проведено исследование по выявлению дефектов, в частности тонких сквозных отверстий, в ходе которого обнаружено, что данный метод позволяет обнаружить дефекты, которые находятся в акустическом поле преобразователя на небольшом удалении от линии сканирования.

Список использованных источников и литературы

1. Highly Porous Expanded Graphite: Thermal Shock vs. Programmable Heating / A. G. Bannov, A. V. Ukhina, E. A. Maksimovskii, I. Yu. Prosanov // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, no. 24. – 7687 p. – DOI: 10.3390/ma14247687.
2. Influence of thermal treatment on the structure and electrical conductivity of thermally expanded graphite / Alina Madalina Darabut, Y. Lobko, Yu. Yakovlev, M. G. Rodriguez // *Advanced Powder Technology*. – 2022. – Vol. 33, no. 12. – P. 103884. – DOI: 10.1016/j.apt.2022.103884.

3. Thermally expanded graphite from graphite nitrate cointercalated with ethyl formate and acetic acid: morphology and physicochemical properties / Yu. V. Berestneva, E. V. Raksha, A. A. Voitash, G. M. Arzumanyan, M. V. Savoskin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012004.

4. 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.

A. V. Blinova ✉, postgraduate student

L. A. Denisov, master student

E-mail: anna.tarasovaaa@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Detection of Defects of Thermally Expanded Graphite Sheets by Acoustic Method

This paper presents the results of changing the amplitude of the acoustic signal of the sound frequency that passed through the samples of sheets of thermally expanded graphite without defects relative to the amplitude of the acoustic signal for the same samples and measurement points, but with artificially created defects in the form of through holes of known diameters. The effect of the defect size on the amplitude deviation directly above the defect, as well as in the area with a radius of 5 cm relative to the defect, is investigated. The influence of the density of sheets of the same thickness on the change in the amplitude of the acoustic signal is estimated.

Keywords: thermally expanded graphite, amplitude-shadow method, density, measurement, sheet, acoustic signal defect.

УДК 534.8.081.7

О. П. Богдан , канд. техн. наук, доц.

П. В. Загвозкин, студент

С. А. Сидоров, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

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

Исследование коэффициента прохождения акустической волны сквозь лист пенополиэтилена

В работе представлены результаты исследования влияния на коэффициент прохождения акустической волны сквозь лист пенополиэтилена поглощенной влаги после погружения и выдержки исследуемых объектов в воде. Показано нелинейное уменьшение коэффициента прохождения акустической волны с ростом влагопоглощения.

Ключевые слова: пенополиэтилен, коэффициент прохождения, акустическая волна, амплитуда прошедшей волны, влагопоглощение.

Введение

Пенополиэтилен представляет собой полимерный пористый материал, обладающий рядом уникальных свойств, широко применяемый для тепло-, гидро-, шумоизоляции и виброгашения [1, 2] в различных областях промышленности, таких как строительство, нефтегазовая промышленность, машиностроение, авиация и т. д., а также активно используется в медицине, спорте и быту.

Ввод в эксплуатацию изделий и заготовок из пенополиэтилена требует проведения приемо-сдаточных испытаний, в рамках которых контролируются их физические характеристики, например плотность, влагопоглощение, теплопроводность, сжимаемость, звукопоглощение, предел прочности, электретные свойства и др. [1–6], требования к которым зависят от области применения. Несмотря на наличие стандартизированных методов контроля (ГОСТ Р 58955–2020, ГОСТ Р 56729–2015) физических характеристик пенополиэтилена, активно ведутся исследования по разработке новых методов [2, 5, 6], позволяющих комплексно оценивать состояние пенополиэтилена, а также устанавливать взаимосвязь между отдельными характеристиками [3, 4].

В данной работе представлен акустический метод контроля [7, 8] листов пенополиэтилена и исследована возможность его использования для контроля влагопоглощения.

Целью работы является исследование влияния на коэффициент прохождения акустической волны сквозь лист пенополиэтилена изменения процентного содержания поглощенной им воды.

Методы и материалы

Исследование коэффициента прохождения D акустической волны сквозь лист пенополиэтилена выполнено бесконтактным акустическим теневым методом с использованием экспериментальной установки для контроля пористых материалов (патент № 2796231) [7–9], входящей в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий».

Коэффициент прохождения D определялся по формуле

$$D = \frac{U}{U_V} \cdot 100, \quad (1)$$

где U – амплитуда акустической волны, прошедшей сквозь лист пенополиэтилена; $U_V = 772$ мВ – амплитуда акустической волны, прошедшей по воздуху в отсутствие листа пенополиэтилена.

Коэффициент прохождения D акустической волны сквозь лист пенополиэтилена измерялся для сухого листа и листа пенополиэтилена, погруженного и выдержанного в воде время t , с последующей оценкой влагопоглощения W_p .

Для определения влагопоглощения W_p пенополиэтилена использовался метод 2А при полном погружении по ГОСТ EN 12087–2011, суть которого сводится к измерению массы образца до и после погружения в воду. Влагопоглощение W_p пенополиэтилена рассчитывалось по формуле

$$W_p = \frac{m - m_0}{V} \cdot \frac{100}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (2)$$

где m – масса образца после погружения в воду; m_0 – начальная масса образца; V – объем образца; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000$ кг/м³ – плотность воды.

Для измерения массы образцов использовались аналитические весы SCL-300 II класса точности с ценой деления 0,01 г. Объем образца рассчитывался на основе измерений линейных размеров с помощью штангенциркуля ШЦЦ-1-125 с точностью 10 мкм.

Результаты и их обсуждение

В работе исследованы образцы пенополиэтилена марки ISOLON 500 (ТУ 2244-037-00203476–2012), основные характеристики которых представлены в таблице ниже. Для каждого образца до погружения в воду измерена амплитуда прошедшего сигнала U и определен коэффициент прохождения D . Для образцов № 1 и № 2 коэффициент прохождения D имеет одинаковое значение, так как они имеют близкие значения произведения плотности ρ и толщины h .

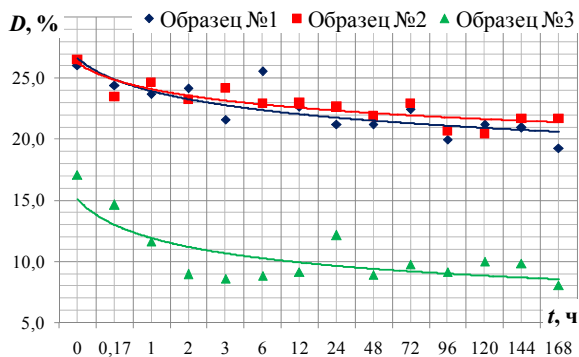
Характеристики исследуемых образцов пенополиэтилена

Образец / маркировка	Толщина h , мм	Плотность ρ , кг/м ³	Амплитуда прошедшего сигнала U , мВ	Коэффициент прохождения D , %
№ 1 / ISOLON 500 1501	1,12 ± 0,01	69 ± 6	201	26,1
№ 2 / ISOLON 500 3003	2,13 ± 0,02	37 ± 3	205	26,5
№ 3 / ISOLON 500 3005	4,78 ± 0,05	38 ± 7	133	17,1

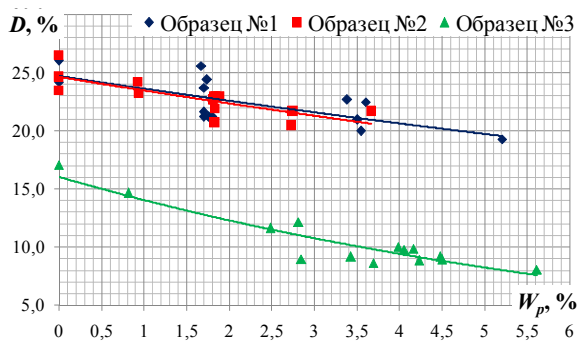
Все образцы пенополиэтилена были погружены в воду и выдерживались в ней в течение времени $t = 0,17 - 168$ ч с последующим измерением коэффициента прохождения D и влагопоглощения W_p после изъятия их из воды. Графики зависимости коэффициента прохождения D от времени t выдержки листа пенополиэтилена в воде и от его влагопоглощения W_p представлены на рис. 1.

Как видно из графика на рис. 1, *а*, увеличение времени выдержки t образцов пенополиэтилена в воде приводит к нелинейному уменьшению коэффициента прохождения D вследствие увеличения влагопоглощения, приводящего к росту кажущейся плотности образцов. Для образцов № 1 и № 2 изменение коэффициента прохождения D имеет идентичный характер в связи с близким значением произведения плотности ρ на толщину h . Для образца № 3 данная зависимость имеет более крутой вид, что может объясняться большей пористостью. Зависимость (рис. 1, *б*) коэффициента прохождения D акустической волны сквозь образец пенополиэтилена от его влагопоглощения W_p носит аналогичный характер.

Отклонение полученных значений коэффициента прохождения D акустической волны сквозь образец пенополиэтилена от линии тренда может объясняться повышенным локальным поглощением воды, а также шероховатостью поверхности, вследствие чего отдельные капли воды могут задерживаться на поверхности образца и приводить к большому уменьшению амплитуды прошедшего сигнала.



а



б

Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения D от времени выдержки листа пенополиэтилена в воде (а) и его влагопоглощения W_p (б)

Измерив коэффициент прохождения D акустической волны сквозь образец пенополиэтилена, по данной зависимости (рисунок (б)) может быть определено влагопоглощение как в лабораторных и производственных условиях, так и в условиях эксплуатации. При этом может быть определено распределение коэффициента прохождения D акустической волны по листу пенополиэтилена [8], а следовательно, возможно определить локальное значение влагопоглощения и его распределение по листу, что не позволяет ни один существующий на данный момент метод.

В зависимости от области применения требования к допустимому значению влагопоглощения W_p пенополиэтилена могут отличаться, например:

– влагопоглощение W_p пенополиэтилена, применяемого в строительстве, не должно превышать 1–3,5 % при выдержке в воде в течение месяца и менее 1 % при выдержке в воде 96 часов;

– влагопоглощение W_p пенополиэтилена, применяемого для изготовления спасательных жилетов, не должно превышать 5 % при выдержке в воде 24 часа.

Выводы

В работе показано влияние значения влагопоглощения пенополиэтилена на величину коэффициента прохождения D акустической волны сквозь образец пенополиэтилена. Полученные результаты могут быть положены в основу новой методики по определению локального влагопоглощения и его распределения по листу пенополиэтилена с использованием акустического контроля, основанного на измерении коэффициента прохождения, что может быть достаточно важным в случае применения его для гидроизоляции или в условиях повышенной влажности.

Список использованных источников и литературы

1. 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.

2. Звукоизоляционная характеристика вспененного полипропилена на примере виброшумоизоляционного материала Пенотерм RenoProf НПП ЛЭ / О. П. Шабалова, Д. В. Семеновко, Е. Н. Голякина [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 2 (41). – С. 78–90. – EDN VPWHQN.

3. Дементьев, А. Г. Деформирование химически сшитого пенополиэтилена. 2. Связь между структурой, механическими свойствами и термическим деформированием пенополиэтилена / А. Г. Дементьев, Г. Н. Матюхина, А. В. Панкратов // Пластические массы. – 2013. – № 5. – С. 16–19. – EDN RPKIGN.

4. Гильманов, И. Р. Влияние способа шивки и рецептуры пенополиэтилена на его электретные свойства / И. Р. Гильманов, М. Ф. Галиханов, А. Р. Гильманова // Российский химический журнал. – 2021. – Т. 65, № 1. – С. 41–46. – DOI: 10.6060/rj.2021651.4. – EDN TJUEEF.

5. Леньков, С. В. Резонансный метод измерения вязкоупругих свойств демпфирующих материалов типа пористых закрытоячеистых пенополиэтиленов / С. В. Леньков, С. М. Молин, А. Г. Копытов // Дефектоскопия. – 2014. – № 3. – С. 57–63. – EDN SHORVR.

6. 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.

7. 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. – EDN РНЮОД.

8. 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, S. M. Molin, A. V. Platonov // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12, no. 1. – Pp. 58–66. – EDN AKZRSP.

9. Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований / Д. В. Злобин, Л. В. Волкова, О. П. Богдан, Т. И. Земсков, С. В. Казанцев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 28–36. – EDN DBTXXKU.

O. P. Bogdan [✉], CSc in engineering, associate professor

P. V. Zagvozhkin, student

S. A. Sidorov, student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Investigation of the Transmission Coefficient of an Acoustic Wave through a Sheet of Polyethylene Foam

The paper presents the results of a study of the effect on the coefficient of passage of an acoustic wave through a sheet of polyethylene foam of absorbed moisture after immersion and exposure of the studied objects in water. A nonlinear decrease in the acoustic wave transmission coefficient with an increase in moisture absorption is shown.

Keywords: polyurethane foam, transmission coefficient, acoustic wave, amplitude of the transmitted wave, moisture absorption.

УДК 620.179.16

А. Л. Владыкин, аспирант

E-mail: pmkk@istu.ru

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

Оценка скорости объемных волн в образце из стали 17-4 РН, полученной 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 в зависимости от направления хода луча относительно поляризации волн.

Ключевые слова: структуроскопия, скорости акустических волн, зеркально-теневой метод многократных отражений, электромагнитно-акустический преобразователь, сталь 17-4 РН.

Введение

Одним из быстроразвивающихся направлений изготовления стальных изделий являются аддитивные технологии. Однако возникают сложности надежного контроля подобных изделий неразрушающими методами из-за особенностей структуры материала, рассматриваемой многими авторами [1, 2].

Перспективным методом решения данной проблемы являются акустические методы контроля с использованием электромагнитно-акустических преобразователей и гибких пьезопреобразователей на основе ПВДФ-пленки [3–5].

Целью работы является оценка влияния направления поворота хода луча на скорости продольной и поперечной волн в образце стали 17-4 РН.

Материалы и методы

Исследовался образец из стали 17-4 РН, изготовленный методом селективной лазерной плавки (SLM) (рис. 1). Химический состав стали

© Владыкин А. Л., 2024

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).

17-4 PH (AISI): С – 0,07 %, Cr – 17 %, Ni – 4 %, Cu – 4 %. Образец выполнен в виде диска диаметром 75 мм и толщиной 15 мм.

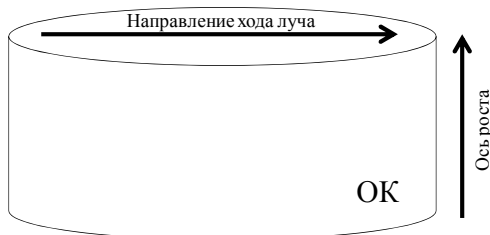


Рис. 1. Схема направления хода луча и оси роста образца

Измерения проводились с помощью электромагнитно-акустического 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.

Поляризации продольной и поперечной волны совпадают и перпендикулярны оси роста (рис. 2).

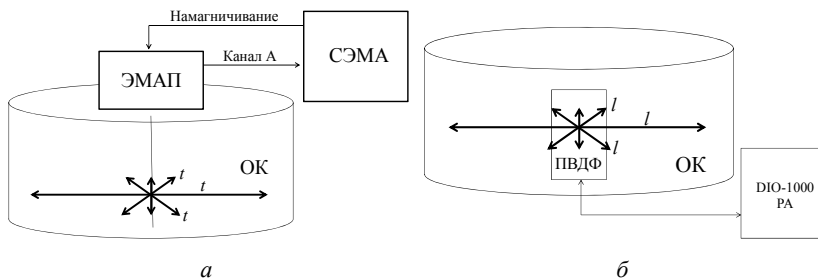


Рис. 2. Направление поляризации поперечной волны (а) и продольной волны (б)

В ходе эксперимента была получена серия многократных эхоимпульсов объемных волн от двух плоскопараллельных граней образца и переотражений по диаметру образца каждые 10 градусов.

Скорость ультразвуковых волн была рассчитана в соответствии с уравнением, учитывающим многократное отражение волны:

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

где d – среднее значение диаметра (толщины) рабочей зоны, мм; n – количество отражений; Δt – время между n отражениями, мс.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показан вид индикатрисы скорости поперечной волны для образца от угла поворота преобразователя относительно направления хода луча лазера. В ходе эксперимента обнаружено, что скорость поперечной волны резко изменяется на 20 м/с с периодичностью 90 градусов, что указывает на наличие анизотропии образца.

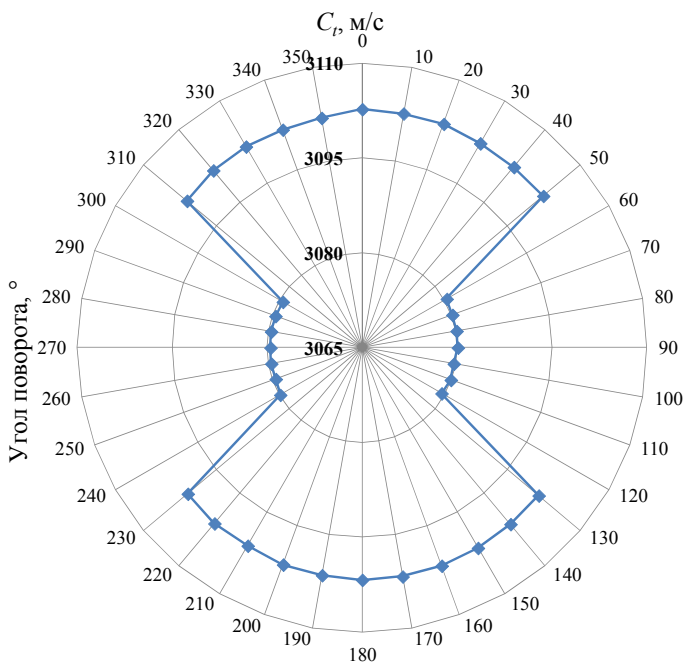


Рис. 3. Результаты измерения скорости поперечной волны

Скорость же продольной волны (рис. 4) плавно изменяется в пределах 40–50 м/с с периодичностью 45 градусов, что также указывает на анизотропию материала, но изменяется по-другому по сравнению с поперечной волной.

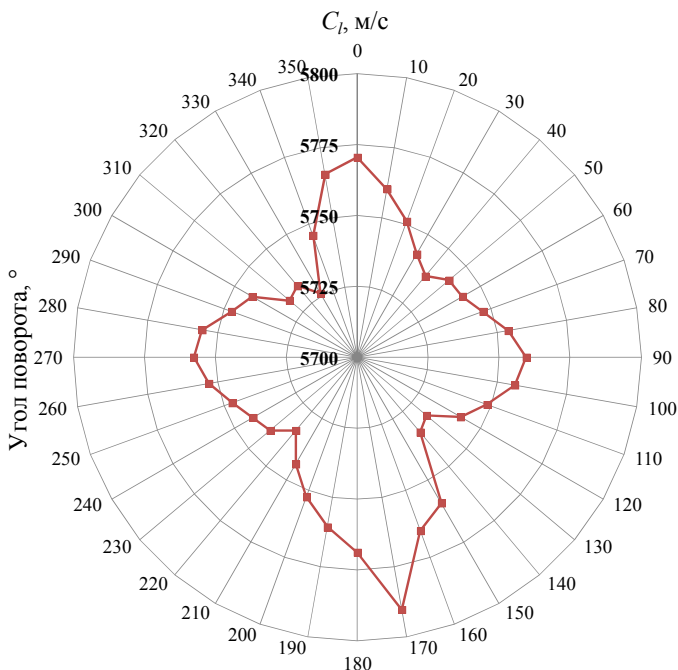


Рис. 4. Результаты измерения скорости продольной волны

Выводы

Исследованы акустические свойства образца аддитивного производства, изготовленного из стали 17-4 PH. Использование поперечных и продольных волн одинаковых поляризаций позволяет определить скорости объемных волн.

Изменение скорости продольной волны в зависимости от направления печати составляет 0,86 %, для поперечной волны это различие меньше и составляет 0,65 %.

Список использованных источников литературы

1. Лазерная аддитивная 3D-печать титановых сплавов: современное состояние, проблемы, тенденции / Н. В. Казанцева, П. В. Крахмалев, И. А. Ядройцева, И. А. Ядройцев // Физика металлов и металловедение. – 2021. – Т. 122, № 1. – С. 8–30. – DOI: 10.31857/S001532302101006X. – EDN WLAJLJ.
2. Магнитные свойства циклически деформированной растяжением стали 09Г2С, изготовленной с помощью селективного лазерного сплавления /

А. Н. Сташков, А. П. Ничипурук, Е. А. Щапова [и др.] // Дефектоскопия. – 2023. – № 1. – С. 44–52. – DOI: 10.31857/S0130308223010050. – EDN BVMBTK.

3. Волкова, Л. В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев // Сталь. – 2021. – № 5. – С. 36–41. – EDN HCVGLB.

4. Acoustic properties of low-carbon 2% Mn-doped steel manufactured by laser powder bed fusion technology / O. Murav'eva, V. Murav'ev, L. Volkova [et al.] // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 51. – P. 102635. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102635. – EDN SCEQTZ.

5. Акустическая структуроскопия медных образцов после равноканального углового прессования / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, С. В. Леньков [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 6. – С. 31–38. – DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-31-38. – EDN GOWOPY.

A. L. Vladykin, postgraduate student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Estimation of the Velocity of Volumetric Waves in a 17-4 PH Steel Sample Obtained by Additive Technology

The paper presents the results of measuring the velocity of acoustic waves in a sample made by selective laser sintering. It is shown how the velocity of propagation of longitudinal and transverse waves varies depending on the direction of printing.

Keywords: structroscopy, acoustic wave velocities, mirror shadow method of multiple reflections, steel 17-4 PH.

УДК 620.179.16

Л. В. Волкова , канд. техн. наук, доц.

А. А. Кондаков, студент

Д. А. Петров, аспирант

E-mail: ludmila396@rambler.ru

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

Оценка акустической анизотропии в технологическом цикле производства плашек буровых ключей

В статье представлены результаты акустической анизотропии плашек буровых ключей. Оценка акустической анизотропии производилась с использованием двух типов волн: головной волны и волны Рэлея. Исследовались различные частотные диапазоны для поиска максимальной чувствительности к анизотропному состоянию. Выявлено, что наиболее чувствительной к анизотропии является волна Рэлея на частоте 3,7 МГц.

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

Введение

Напряженное состояние в стальных элементах металлоконструкций является важным показателем при эксплуатации изделий. При различных условиях работы, связанных воспринимаемыми нагрузками, изменение напряжений в элементе стальной конструкции может меняться и превысить допустимое значение, что может привести к ее разрушению. Таким образом, измерение напряженного состояния в различных элементах металлоизделий является важным фактором для оценки безопасности эксплуатации. При этом одним из показателей оценки напряженного состояния является акустическая анизотропия металла.

В настоящее время одним из перспективных методов оценки остаточных напряжений является метод акустоупругости [1]. Большое количество исследований [2] посвящено взаимосвязи между скоростями продольных, поперечных и поверхностных волн с напряженным состоянием. Было обнаружено [3], что наибольшей чувствительностью к напряженному состоянию обладает скорость критически преломленной продольной волны (головная волна LCR), распространяющаяся

вдоль направления напряжений. Благодаря таким преимуществам, как небольшое затухание и высокая стабильность, головная волна обладает высоким потенциалом применения для измерения абсолютного значения напряжения [4].

Согласно закону Снеллиуса [5], когда продольная волна падает под первым критическим углом, преломленная продольная волна распространяется параллельно поверхности стального элемента, таким образом, генерируется волна LCR.

Целью работы являлось изучить изменение скорости волны в плашках буровых ключей от направления проката.

Описание эксперимента

Для возбуждения головной и релеевской волн на кафедре были изготовлены пьезоэлектрические преобразователи с различной толщиной пьезопластин для поиска более чувствительного к анизотропии частотного диапазона (рис. 1). Рабочие частоты ПЭП головных волн: LCR1 – 3.6 МГц, LCR2 – 2.7 МГц, LCR3 – 4.7 МГц, LCR4 – 9 МГц, релеевских волн: R1 – 4 МГц, R2 – 2.7 МГц, R3 – 5.8 МГц, R4 – 3.7 МГц.

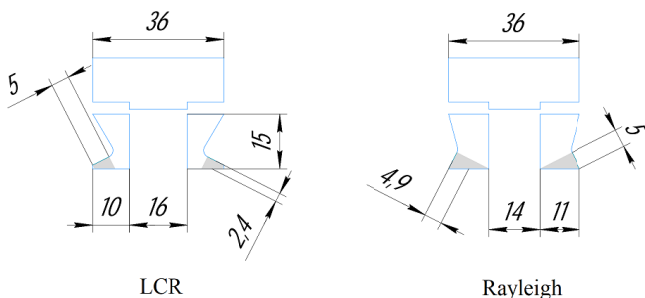


Рис. 1. Пьезоэлектрические преобразователи

Для регистрации принятых сигналов использовался высокочастотный дефектоскоп DIO1000-PA, позволяющий регистрировать сигналы с частотой дискретизации 200 МГц, что обеспечивает точность в измерении времени 5 нс.

В ходе проведения измерений были проконтролированы 8 плашек «Сухарь АКБ-3М2.У21» и 5 подложек к ним длиной 58 мм, шириной 45 мм, толщиной 5 мм, на внутренней поверхности сухаря с использованием медного припоя напаяна заборная часть. Рабочая зона для установки ультразвукового преобразователя 37 мм.

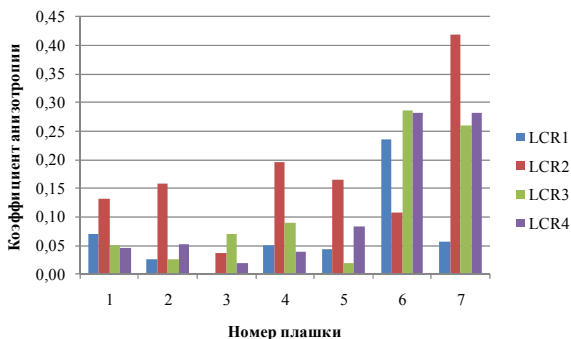
Результаты и их обсуждение

Для оценки изменения скоростей волн в плашках ПЭП поворачивался на 45° относительно ее продольной оси. Оценка акустической анизотропии оценивалась по формуле

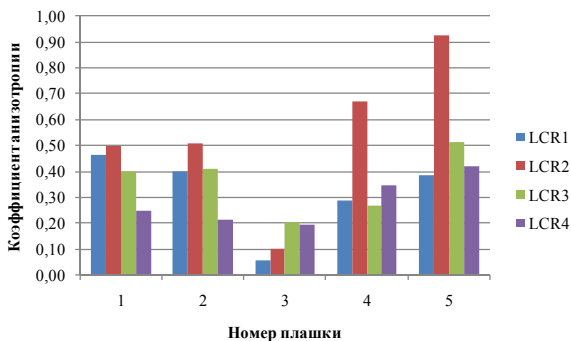
$$a = \frac{C_{90} - C_0}{(C_{90} + C_0)/2}, \quad (1)$$

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

Результаты акустической анизотропии для плашек с напайкой и без напайки, измеренные с использованием головной волны, представлены на рис. 2.



a



б

Рис. 2. Гистограммы акустической анизотропии плашек с напайкой (*a*) и без напайки (*б*), измеренные с использованием головной волны

По гистограммам видно, что акустическая анизотропия наблюдается для плашек без напайки и достигает 0,9 %, при этом наиболее чувствительным является преобразователь с частотой 2,7 МГц. Для плашек с напайкой акустическая анизотропия в два раза ниже и достигает величины 0,4 %.

Результаты акустической анизотропии для плашек с напайкой и без напайки, измеренные с использованием рэлеевской волны, представлены на рис. 3.

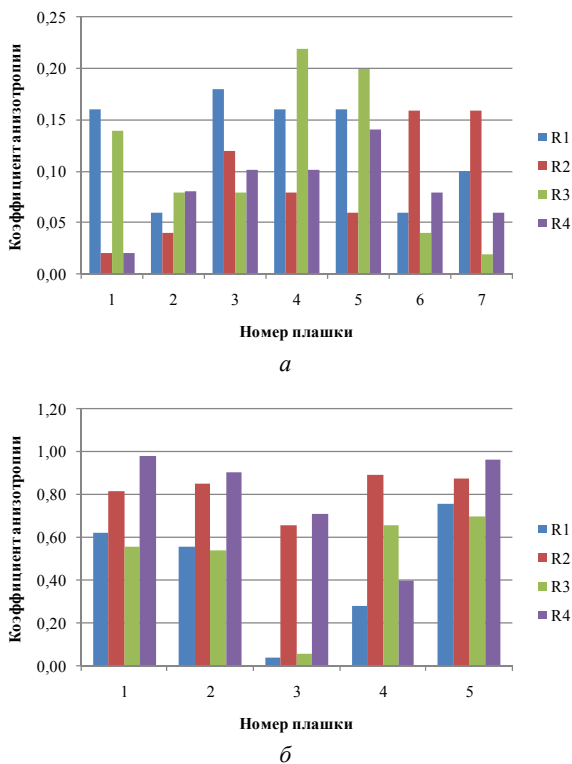


Рис. 3. Гистограммы акустической анизотропии плашек с напайкой (а) и без напайки (б), измеренные с использованием рэлеевской волны

По гистограммам видно, что акустическая анизотропия наблюдается для плашек без напайки и достигает 1 %, при этом наиболее чувствительным является преобразователь с частотой 3,7 МГц. Для плашек

с напайкой акустическая анизотропия в несколько раз ниже и достигает величины 0,2 %.

Выводы

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований определен наиболее чувствительный диапазон преобразователей для контроля анизотропии плашек буровых замков. Выявлено, что наиболее существенной анизотропией обладают плашки без напайки, после напайки анизотропия свойств акустических волн существенно снижается. Выявлено, что волна Рэлея более чувствительна к анизотропии, но одним из недостатков использования волны является ее чувствительность к качеству поверхности.

Список использованных источников и литературы

1. Акустические методы оценки структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, А. В. Байтерьяков // Сварка и диагностика. – 2015. – С. 285–290.
2. 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. 42–652.
3. Чувствительность разных типов волн при ультразвуковой структуроскопии сварных швов рельсов / И. В. Булдакова, Л. В. Волкова, А. Ю. Будрин, С. В. Казанцев, М. А. Понькин // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 176–182.
4. Методика оценки неопределенности измерений механических напряжений ультразвуковым методом с помощью оптико-акустического раздельно-совмещенного преобразователя / А. В. Федоров, В. А. Быченко, И. В. Беркутов, И. Е. Алифанова // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 7 (277). – С. 56–61.
5. *Разыграев, Н. П.* Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // Дефектоскопия. – 2020. – № 9. – С. 3–19.
6. *Mohammad, M.* Determination of acoustoelastic/acoustoplastic constants to measure stress in elastic/plastic limits by using LCR wave / М. Mohammad, J. F. Javad // NDT and E International. – Vol. 104. – 2019. – Pp. 69–76.
7. *Беляев, А. К.* Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии / А. К. Беляев, В. А. Полянский, Д. А. Третьяков // Механика. – 2020. – № 4. – С. 130–151.

L. V. Volkova [✉], CSc in engineering, associate professor
A. A. Kondakov, student
D. A. Petrov, postgraduate student
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Evaluation of Acoustic Anisotropy in the Technological Cycle of Production of Drill Key Dies

The article presents the results of acoustic anisotropy of drill key dies. The acoustic anisotropy was estimated using two types of waves: the head wave and the Rayleigh wave. Various frequency ranges were investigated to find the maximum sensitivity to the anisotropic state. It is revealed that the Rayleigh wave at a frequency of 3,7 MHz is the most sensitive to anisotropy.

Keywords: drill key dies, head wave, Rayleigh wave, anisotropy.

УДК 620.179.16

Л. В. Волкова , канд. техн. наук, доц.

В. А. Макарова, магистрант

Р. Ю. Егоров, магистрант

E-mail: ludmila396@rambler.ru

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

Оценка акустической анизотропии металлических труб и листов при использовании SH-волн и волн Лэмба

В работе рассмотрены результаты исследования изменения скоростей нормальной SH-волны и симметричной волны Лэмба в металлических трубах и листах с толщиной 8, 12 и 16 мм от положения раздельных пьезопреобразователей с сухим точечным контактом относительно проката. Результаты экспериментальных исследований позволят оценить коэффициенты акустической анизотропии трубного и листового проката для дальнейшей оценки напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: акустическая анизотропия, поворот преобразователей, скорость распространения волн.

Введение

В настоящее время металлы активно применяются в различных отраслях промышленности и научных исследованиях. Однако на практике металлы не всегда проявляют одинаковые свойства во всех направлениях. Это свойство называется анизотропией и имеет большое значение при проектировании механизмов, где необходимы высокие показатели прочности и долговечности металла [1, 2].

В работах [3–5] приведены результаты оценки коэффициентов анизотропии по скорости распространения волн, величина анизотропии составила 0,6–2,7 % при исследовании акустических свойств тонколистового проката из низкоуглеродистой стали с использованием волн Лэмба. Чувствительность ультразвуковых волн к анизотропии свойств в значительной степени зависит от частотного диапазона прозвучивания и толщины анализируемого материала.

© Волкова Л. В., Макарова В. А., Егоров Р. Ю., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252>.

Целью работы является исследование распространения ультразвуковых волн для дальнейшего определения акустической анизотропии материала.

Описание эксперимента

Акустическая анизотропия металла проявляется в различии скоростей распространения ультразвуковых волн в металлах вдоль и поперек проката при изготовлении трубы или ее заготовки в виде листа.

Измерения скоростей проводились с помощью низкочастотного ультразвукового дефектоскопа DIO1000PA, для возбуждения и приема волн использовались отдельные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом, которые были разработаны на кафедре «Приборы и методы измерения, контроля, диагностики» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. В качестве образцов были предоставлены металлические листы и трубы диаметром 1420 мм с толщиной стенки 8, 12 и 16 мм, изготовленные из марки стали Ст3 и 09Г2С.

В процессе измерений регистрировался первый пришедший импульс с частотой дискретизации 200 МГц, что обеспечивает точность измерения времени 5 нс, что приводит к инструментальной погрешности измерения скорости 0,5 м/с.

В процессе измерений преобразователи поворачивались от 0 до 360° от направления проката с шагом 10° при помощи шаблона кругового транспортира. В программном обеспечении Mathcad была применена функция автокорреляции импульсов, принятых отдельным пьезопреобразователем сигналов ультразвуковых волн, для обработки полученных результатов.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований показывают изменение скорости симметричной волны Лэмба в листах (рис. 1, а) и трубах (рис. 1, б) различной толщины от угла поворота пьезопреобразователей относительно проката металла.

Мы наблюдаем, что разность по скоростям волны Лэмба у листа с толщиной 8 мм составила 27 м/с, а у трубы с толщиной стенки 8 мм – 88 м/с. При исследовании разницы по скоростям листа и трубы с толщиной 12 мм составляет 62 м/с и 66 м/с. Увеличение изменения скоростей в трубах относительно листов той же толщины связано с геометрической анизотропией труб, возникающей в процессе ее изготовления.

Результаты экспериментальных исследований изменения скорости нормальной SH-волны приведены на рис. 2.

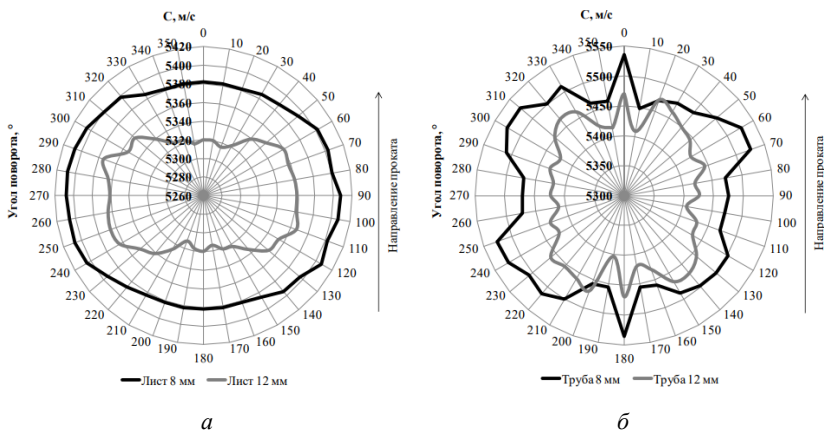


Рис. 1. Угловое распределение скорости волн Лэмба: в листах (а); в трубах (б)

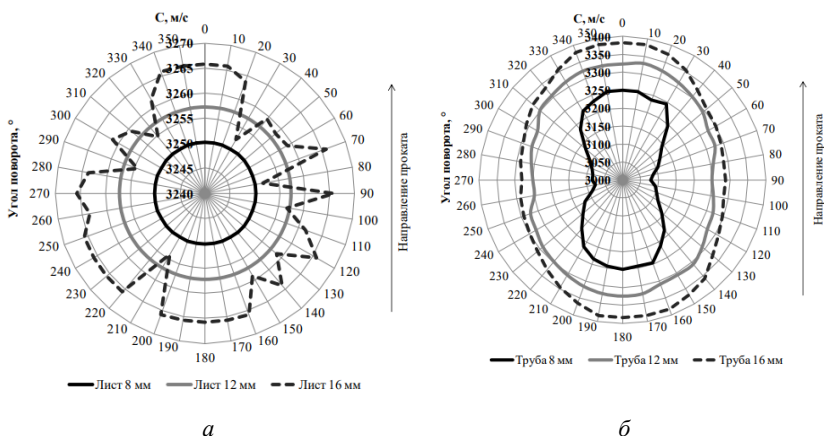


Рис. 2. Угловое распределение скорости SH-волны: в листах (а); в трубах (б)

По результатам исследования получено, что разность по скоростям SH-волны у листов с толщиной 8 мм и 12 мм составило 0 м/с, а у листа с толщиной 16 мм – 14 м/с. У трубы с толщиной стенки 8 мм разница по скоростям волн имеет 174 м/с, а у труб с толщиной стенки 12 мм и 16 мм составило 80 м/с и 102 м/с соответственно. Таким образом, мы можем наблюдать акустическую анизотропию свойств по изменению скоростей распространения волн вдоль и поперек проката, а также оце-

нить геометрическую анизотропию в трубах. При этом наиболее чувствительной к анизотропии проката является нормальная SH-волна.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований показывают изменение скоростей распространения волны в зависимости от направления проката образцов, а также толщины объекта. Полученные результаты показали, что толстолистовой прокат и трубы обладают акустической анизотропией, которая проявляется в различных значениях скорости распространения ультразвука в различных направлениях.

Список использованных источников и литературы

1. *Адамеску, Р. А.* Анизотропия физических свойств металлов / Р. А. Адамеску, П. В. Гельд, Е. А. Митюшев // *Металлургия* г. Москва. – 1985. – С. 136.
2. Влияние пластической деформации на анизотропию упругих свойств и скорости ультразвуковых волн в низкоуглеродистой стали / А. В. Гончар, К. В. Курашкин, О. А. Сергеева, А. А. Соловьев // *Проблемы прочности и пластичности*. – 2022. – Т. 84, № 2. – С. 259–271.
3. *Murav'eva, O. V.* Methodological peculiarities of using SH- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats / O. V. Murav'eva, V. V. Murav'ev // *Russian journal of nondestructive testing*. – 2016. – Vol. 52, no. 7. – Pp. 363-369.
4. *Волкова, Л. В.* Оценка собственной акустической анизотропии металлических листов с использованием ультразвукового метода / Л. В. Волкова, А. М. Решетникова, В. А. Макарова // *Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XVIII Всерос. науч.-техн. конф., Ижевск, 23–25 нояб. 2022 г.* – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 197–203. – EDN NHGSSB.
5. *Золотова, О. П.* Распространение волн Лэмба и SH-волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла / О. П. Золотова, С. И. Бурков, Б. П. Соколин // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика*. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 185–204.

L. V. Volkova [✉], CSc in engineering, associate professor
V. A. Makarova, master student
R. Yu. Egorov, master student
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Evaluation of Acoustic Anisotropy of Metal Pipes and Sheets Using SH Waves and Lamb Waves

The paper considers the results of a study of the effect of piezoelectric transducer rotations on the speed of a normal SH wave and a symmetrical Lamb wave in metal pipes and sheets with a thickness of 8, 12 and 16 mm. The results of experimental studies will allow us to estimate the acoustic anisotropy coefficients of pipe and sheet metal for further evaluation of the stress-strain state.

Keywords: acoustic anisotropy, transducer rotation, the speed of wave propagation.

УДК 620.179.16

*С. Ю. Ворончихин*², генеральный директор

*Г. А. Полянкин*², инженер

*П. Э. Александров*¹, магистрант

*М. С. Зорин*¹, студент

*А. С. Масленников*¹, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

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

² АО «ИнтроСкан Технолоджи», г. Чайковский

Устройство формирования последовательности заданного числа импульсов

В работе описана конструкция устройства формирования последовательности заданного числа импульсов. Необходимая последовательность формируется аппаратным модулем на основе логических элементов, обеспечивающем необходимую точность временных параметров. Управление модулем осуществляется посредством микроконтроллера. Описанное устройство позволяет решать ряд задач, связанных с возбуждением ультразвуковых преобразователей, а также измерением их характеристик.

Ключевые слова: генератор, последовательность импульсов, логические элементы, микроконтроллер, ультразвуковой преобразователь.

Введение

Большая часть приборов ультразвукового контроля (УЗК) выполнена по следующей схеме: генератор зондирующих импульсов (ГЗИ) возбуждает ультразвуковой преобразователь. О наличии дефекта в объекте контроля (ОК) свидетельствует либо появление эхо-импульса на дефектограмме (эхо-метод), либо ослабление донного импульса (теневой, зеркально-теневой методы) [1]. Большинство современных дефектоскопов имеют возможность возбуждать, помимо одного импульса, последовательность из заданного количества периодов, длительность которых может точно устанавливаться. Данная функция позволяет повысить эффективность возбуждения преобразователя, производить измерения его характеристик [2], а также получать дополнительную информацию об объекте контроля [3]. Такая возможность полезна и при эксперимен-

тальных исследованиях, однако ее реализация требует (особенно на частотах выше 1 МГц) достаточно сложного в изготовлении и программировании устройства, содержащего микросхему ПЛИС [4], так как типовые микроконтроллеры, применяемые в конструкциях генераторов [5, 6], на этих частотах не обеспечивают необходимой точности и дискретности установки временных интервалов.

Целью данной работы является разработка устройства для формирования пакетов, содержащих заданное число импульсов.

Методы

Для преодоления перечисленных недостатков разработано устройство, ключевым узлом которого является аппаратный модуль на основе интегральных микросхем (ИМС) стандартной логики, работающий под управлением микроконтроллера ATmega328. Схема устройства представлена на рис. 1.

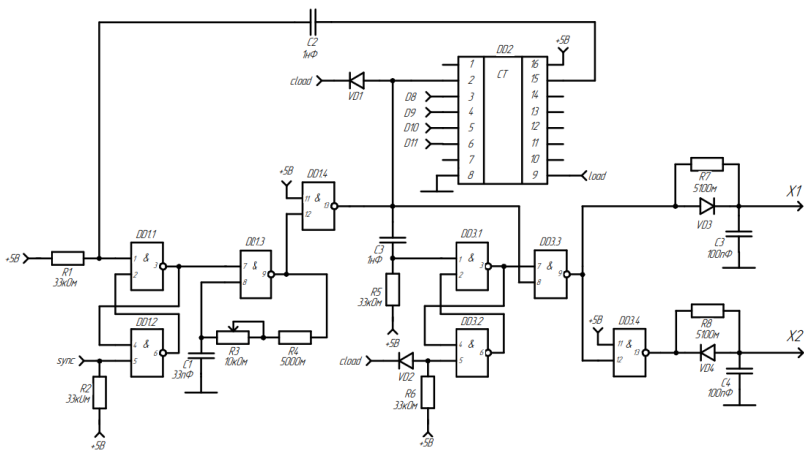


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема устройства формирования заданного числа импульсов

Процесс генерации осуществляется следующим образом: импульс SYNC, задающий частоту посылок, формируется микроконтроллером, переводя RS-триггер, собранный на элементах DD1.1 и DD1.2 (ИМС 74HC132), в состояние, разрешающее работу генератора (элемент DD1.3). Период формируемых импульсов устанавливается номиналами элементов C1, R3. Импульсы генератора поступают на тактовый вход счетчика DD2 (ИМС 74HC163), который при переполнении вырабаты-

вает импульс, переключающий триггер в состояние, запрещающее работу генератора.

Для задания необходимого числа импульсов N в счетчик до прихода синхроимпульса SYNC посредством выводов D8–D11 микроконтроллера загружается число $(15-N)$, этот процесс инициируется подачей импульса LOAD с микроконтроллера. После загрузки числа импульсов выполняется установка счетчика подачей импульса CLOAD. Недостатком данной схемы является отличие по длительности первого вырабатываемого генератором импульса, связанное с тем, что процесс его формирования начинается, когда выход ИМС находится в состоянии логической единицы, а затем переключается между порогами срабатывания триггера Шмитта.

Блок, исключаящий первый импульс из последовательности, построен на элементе DD3 (ИМС 74HC132). Импульс CLOAD одновременно с установкой счетчика переводит триггер (DD3.1, DD3.2) в положение, препятствующее прохождению импульсов на вход инвертора DD3.3. По приходу первого импульса положительный его фронт не изменяет состояние схемы, а отрицательный переводит триггер в противоположное состояние, при этом на выходе инвертора появляется последовательность, но уже без первого импульса. Противофазная последовательность формируется инвертором DD3.4. Цепи R7, VD3, C3, R8, VD4, C4 обеспечивают защитную задержку для предотвращения сквозных токов ключевых транзисторов. В результате на выводе X1 формируется синфазная последовательность импульсов, а на выводе X2 – противофазная.

Результаты и их обсуждение

Последовательность импульсов, формируемая при помощи разработанного устройства, приведена на рис. 2.

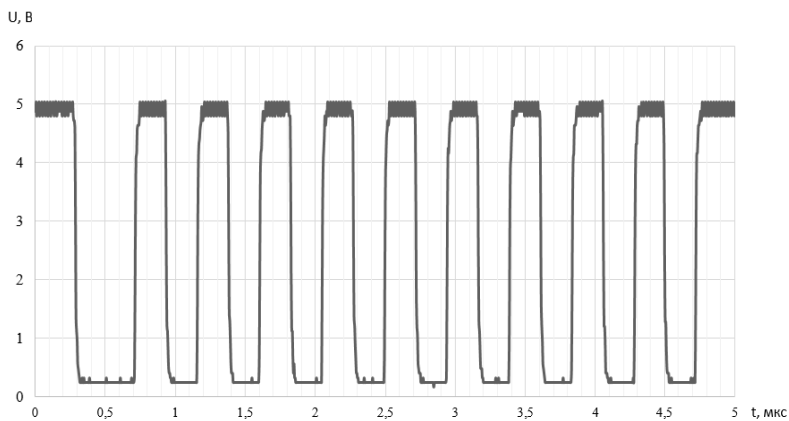
Полученная последовательность импульсов, помимо эффективного возбуждения, позволяет, благодаря возможности гибкой регулировки временных параметров, измерять амплитудно-частотные характеристики преобразователей, а также зависимости затухания ультразвуковых волн от частоты в различных средах.

Основные характеристики разработанного устройства приведены в таблице.

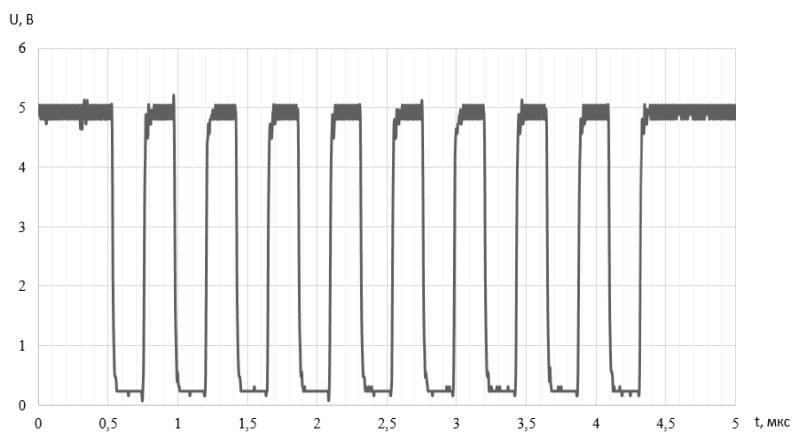
Разработанное устройство используется для улучшения параметров установки, показанной на рис. 3.

Данная установка применяется в исследовательских целях, связанных с измерением параметров преобразователей для внутритрубной диагностики, повышение точности формирования измерительных им-

пульсов позволит получать более точные значения измеряемых параметров преобразователей.



a



б

Рис. 2. Последовательность импульсов, формируемая устройством: включающая первый импульс (*a*), с исключенным первым импульсом (*б*)

Характеристики устройства

Параметр	Значение
Число выходных импульсов	1–14
Диапазон регулировки длительности импульсов, мкс	0,1–100
Диапазон регулировки частоты следования посылок, Гц	1–1000
Временная нестабильность фронтов формируемых импульсов, нс	< 1
Длительность задержки от сквозных токов, нс	20



Рис. 3. Установка для измерения параметров ультразвуковых преобразователей

Выводы

Разработано устройство на доступной элементной базе, позволяющее формировать посылки из заданного числа импульсов, обладающие высокой стабильностью временных параметров. Подобное решение может быть использовано для точных измерений параметров акустических датчиков и физических характеристик различных сред.

Списокиспользованных источников и литературы

1. Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований / Д. В. Злобин, Л. В. Волкова, О. П. Богдан [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 28–36. – DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-28-36. – EDN DBTXKU.

2. Морозов, А. А. Установка для исследования АЧХ пьезопреобразователей / А. А. Морозов, Е. В. Соболева, Т. И. Земсков // Выставка инноваций – 2021 (весенняя сессия) : сб. материалов XXXI Республик. выставки-сессии студенческих инновационных проектов и XL науч.-техн. конф. молодежи АО «ИЭМЗ «Купол», Ижевск, 23 марта – 22 апр. 2021 г. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2021. – С. 89–94. – EDN ERCOTF.

3. Диков, И. А. Способы определения объемной доли пор в полимерных композиционных материалах с помощью ультразвуковых методов неразрушающего контроля (обзор) / И. А. Диков, А. С. Бойчук // Труды ВИАМ. – 2017. – № 2 (50). – С. 10. – DOI: 10.18577/2307–6046–2017–0–2–10–10. – EDN XVLMUH.

4. Шляхтин, К. А. Генератор импульсов на ПЛИС для многоканальной системы измерения временных интервалов // Ползуновский альманах. – 2022. – № 4–1. – С. 20–25. – EDN INWLKO.

5. Пономарев, А. В. Применение компьютерных технологий в приборостроении на примере разработки генератора прямоугольных импульсов / А. В. Пономарев // Омский научный вестник. – 2020. – № 2 (170). – С. 71–75. – DOI: 10.25206/1813–8225–2020–170–71–75. – EDN QVBLFO.

6. Лыков, О. В. Разработка генератора импульсов с задаваемой частотой на микроконтроллере / О. В. Лыков, М. П. Маслаков // Лучшая научная статья 2021 : сб. ст. XLV Междунар. науч.-исслед. конкурса, Пенза, 30 нояб. 2021 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. – С. 17–19. – EDN GDXBGO.

*S. Y. Voronchikhin*², general manager

*G. A. Polyankin*², engineer

*P. E. Alexandrov*¹, master student

*M. S. Zorin*¹, student

*A. S. Maslennikov*¹, student

E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² JSC “IntroScan Technology”, Chaykovsky

Device for Generating a Sequence of a Given Number of Pulses

The paper describes the design of a device for generating a sequence of a given number of pulses. The necessary sequence is formed by a hardware module based on logic elements that provides the necessary accuracy of time parameters. The module is controlled by a microcontroller. The described device allows solving a number of tasks related to the excitation of ultrasonic transducers, and measuring their characteristics.

Keywords: generator, pulse sequence, logical elements, microcontroller, ultrasonic transducer.

УДК 681.518.25

*В. Н. Лемонджав*¹ ✉, ст. науч. сотр.
*А. Д. Касьянов*², канд. мед. наук, вед. науч. сотр.
E-mail: ooo.npo.biomedtech@mail.ru ✉

¹ ООО «Научно-производственная организация «БИОМЕДТЕХ», г. Москва
² Российский научно-исследовательский институт гематологии
и трансфузиологии Федерального медико-биологического агентства,
г. Санкт-Петербург

Оценка применимости метода измерения уровня фибриногена по Клауссу в контроле оттаивания свежемороженой донорской плазмы крови

В работе оценивалась применимость метода измерения уровня фибриногена по Клауссу в контроле оттаивания плазмы крови для качественной проверки технологической операции, а также для количественного сравнения значений показателя при однофакторном анализе режимов размораживания. Показаны примеры влияния случайной погрешности в рассматриваемой измерительной задаче.

Ключевые слова: фибриноген, плазма крови, метод измерения по Клауссу.

Введение

В производственной трансфузиологии изготовление свежемороженой плазмы крови сопряжено с операциями, оказывающими различные физические воздействия на исходный донорский биоматериал. При этом методы контроля, применимые в производстве [1], используются также в исследованиях эффективности режимов технологических операций [2]. В таких работах оценка точности измерений осуществляется с вычислением доверительного интервала и среднеквадратической ошибки, что характерно для анализа однофакторных экспериментов [3]. Однако типичные для трансфузионных материалов статистические и методологические проблемы [4] могут приводить к противоречащим выводам из результатов независимых исследований. Например, в обзорной статье [5] показано, что влияние интенсивности оттаивания свежемороженой плазмы на активность антигемофильного глобулина имело в трех работах: прямую, обратную зависимость и не имело влия-

© Лемонджав В. Н., Касьянов А. Д., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00385, <https://rscf.ru/project/23-29-00385/>.

ния. Актуальным является получение достоверных знаний об изменении показателей плазмы для повышения качества производства доз малых объемов [6].

Противоречия в примере представляется возможным снять путем повторной проверки гипотезы с повышением требований к контролируемому оттаиванию. Локальные превышения допустимого теплового воздействия на плазму могли повлиять на результаты работ. Известно, что условный перегрев приводит к снижению уровня белковых компонентов, которое можно выявить при значительном превышении термических воздействий над целевой температурой [2]. Интерес представляет определение этим же методом незначительных превышений температуры. Целью исследования являлась оценка применимости метода измерения уровня фибриногена по Клауссу в контроле оттаивания свежемороженой плазмы крови.

Методы и материалы

В исследовании была использована человеческая плазма крови, полученная путем центрифугирования из цельной крови четырех доноров с неповторяющейся комбинацией характеристик: пол, возраст и группа крови. Для включения гемотранфузионного материала в исследование был установлен критерий по уровню фибриногена. Показатели всех образцов до замораживания должны были соответствовать установленным нормальным значениям, которые для циркулирующего фибриногена варьируются в пределах 1,5–4,0 г/л [7]. Подготовленная для работы плазма крови была разделена на парные образцы равного объема в день донации и заморожена с использованием установки КЛФ 12-18/40 (MABAG, Германия) после определения начального уровня фибриногена при помощи автоматического коагулометра ACL TOP 300 (IL Werfen, США). Для измерений были использованы реагенты HemosIL Q.F.A. Thrombin 0020301800/0020301700 (Werfen S. A., Испания). Для повышения точности измерения начального уровня фибриногена, в отличие от работы [2], было выполнено в два раза больше начальных измерений каждого образца за счет повторяющихся тестов для дальнейшего усреднения двойных замеров.

Технологические операции были единообразными для всех образцов плазмы крови, за исключением размораживания, которое осуществлялось, подобно работам [2], по парному принципу для последующего однофакторного анализа. Способ размораживания описан ранее [8]. Подбор режимов оттаивания с разной интенсивностью теплопередачи от теплоносителя к плазме крови через полимерную стенку контейнера и проверка отсутствия локальных превышений температуры образцов

осуществлены согласно известной методике [9]. Для оттаивания и подогревания образцов была использована экспериментальная установка на базе устройства «Плазмотерм-4», используемого в производственной трансфузиологии и имеющего в реестре Росздравнадзора номер ФСР 2012/13026. После размораживания уровень фибриногена повторно измерялся в каждом образце.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения уровня фибриногена до замораживания экспериментальных образцов объединены в четыре группы и представлены в табл. 1. Объединение выполнено по принципу принадлежности плазмы крови к одной из четырех уникальных донаций, которые позволили получить биоматериалы для данного исследования.

Таблица 1. Результаты измерения уровня фибриногена до замораживания экспериментальных образцов

Номер группы образцов	Среднее, г/л	Стандартное отклонение, г/л	Предел доверительного интервала, г/л	
			Нижний	Верхний
1	2,02	0,07	1,38	2,66
2	1,93	0,03	1,68	2,18
3	2,97	0,14	1,70	4,24
4	2,33	0,11	1,31	3,35

Для расчета границ доверительных интервалов был выбран коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности, равной 0,95, и предположению о том, что выборочные средние соответствуют t -распределению с одной степенью свободы, поскольку выполнялись лишь два повторных измерения в каждой группе. Размеры доверительных интервалов значительно отличаются между группами. Минимальный равен 0,5 г/л, а максимальный составляет 2,54 г/л. Связанный с этим различный размах результатов при равенстве условий подготовки аналитических образцов может быть вызван тем, что погрешность измерения зависит от величины уровня фибриногена [7] и, согласно средним значениям в группах, выборка доноров была разнообразная по этому показателю. Кроме того, несмотря на двукратное увеличение числа повторных измерений по сравнению с предшествующей работой [2], влияние случайной погрешности в измерительной задаче представляется значительным.

Результаты измерения уровня фибриногена после размораживания и нагревания образцов до температуры 36,6 °С в зависимости от условий эксперимента также объединены в четыре группы по тому же прин-

ципу и приведены в табл. 2. Образцы подвергались разной интенсивности нагревания путем изменения для парного образца величины термических, механических или двух видов воздействий одновременно. В каждой паре сравнения за базовую интенсивность оттаивания принята та, которая обеспечивается стандартными настройками устройства: 37 °С и 60 циклов в минуту. Вторые строчки в группах соответствуют режимам специально разработанного технологического задатчика в экспериментальной установке.

Таблица 2. Результаты измерения уровня фибриногена после размораживания и нагревания образцов до температуры 36,6 °С в зависимости от условий эксперимента

Номер группы образцов	Условия эксперимента		Значение уровня фибриногена, г/л	Изменение относительно среднего значения до замораживания, г/л
	Начальная температура теплоносителя, °С	Частота механических воздействий, количество циклов в минуту		
1	37,0	60	1,96	-0,06
	37,4	60	1,87	-0,15
2	37,0	60	1,97	+0,04
	37,4	120	2,04	+0,11
3	37,0	60	3,19	+0,22
	37,0	120	3,3	+0,33
4	37,0	60	2,5	+0,17
	37,0	180	2,4	+0,07

Каждый из вариантов размораживания плазмы крови в представленном исследовании позволил обеспечить высокую сохранность рассматриваемого показателя в пределах нормального диапазона значений. При этом из результатов следует, что изменение уровня фибриногена под влиянием интенсивности отобранных режимов оттаивания значительно меньше случайной погрешности измерения. Сравнение четырех базовых результатов между собой это демонстрирует и подчеркивает значимость уточнения числа повторных измерений для ее снижения.

Выводы

Метод измерения уровня фибриногена по Клауссу может эффективно использоваться в контроле оттаивания плазмы крови для качественной проверки с использованием усреднения двойных замеров до и после технологической операции. Для количественного сравнения режимов размораживания по этому показателю и дальнейшего исследования его

изменчивости требуется уточнение модели измерения на основе представленных результатов.

Список использованных источников и литературы

1. Practical application of mathematical calculations and statistical methods for the routine haematology laboratory [Практическое применение математических расчетов и статистических методов для стандартной гематологической лаборатории] / R. Padmore, K. Petersen, C. Campbell et al // *International Journal of Laboratory Hematology*. – 2022. – No. 44 (S1). – Pp. 11-20. – DOI: 10.1111/ijlh.13934.

2. *Dhantole, L.* A study on factors influencing the hemostatic potential of fresh frozen plasma [Исследование факторов, влияющих на гемостатический потенциал свежезамороженной плазмы] / L. Dhantole, A. Dubey, A. Sonker // *Asian Journal of Transfusion Science*. – 2019. – No. 13 (1). – Pp. 23-29. – DOI: 10.4103/ajts.AJTS_139_17.

3. *Емельянов, А. И.* Сравнительный анализ измерительных систем с применением однофакторных экспериментов / А. И. Емельянов, И. В. Абрамов, А. И. Абрамов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2018. – Т. 16, № 3. – С. 84–89. – DOI: 10.22213/2410-9304-2018-3-84-89. – EDN UZUYJG.

4. Methodological considerations for linked blood donor-component-recipient analyses in transfusion medicine research [Методические соображения по анализу связанных «донор крови-компонент-реципиент» в исследованиях в области трансфузионной медицины] / N. Roubinian, S. Kleinman, E. L. Murphy et al. // *ISBT Science Series*. – 2020. – No. 15 (1). – Pp. 185-193. – DOI: 10.1111/voxs.12518.

5. Термолабильность фактора VIII в донорской свежезамороженной плазме крови / В. Н. Лемонджав, А. В. Четкин, А. Г. Гудков [и др.] // *Гематология и трансфузиология*. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 593–609. – DOI: 10.35754/0234-5730-2021-66-4-593-609. – EDN AULJOM.

6. *Пшениснoв, К. В.* Массивная кровопотеря в педиатрической практике / К. В. Пшениснoв, Ю. С. Александрoвич // *Гематология и трансфузиология*. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 70–86. – DOI: 10.35754/0234-5730-2020-65-1-70-86. – EDN CFAJVB.

7. *Guven, B.* Comparison of Fibrinogen Concentrations Determined by the Clauss Method with Prothrombin-Derived Measurements on an Automated Coagulometer [Сравнение концентрации фибриногена, определенной по методу Клаусса, и протромбина, определенного на автоматическом коагулометре] / B. Guven, M. Can, A. Tekin // *The Journal of Applied Laboratory Medicine*. – 2022. – No. 7 (6). – Pp. 1337-1345. – DOI: 10.1093/jalm/jfac066.

8. Пат. 2775883 Рос. Федерация : МПК А61J 3/00, А61М 5/44. Способ подготовки к трансфузии свежезамороженной плазмы крови и устройство для его осуществления / Лемонджав В. Н. – Заявка № 2021129860 от 14.10.2021. – Оpubл. 11.07.2022. – Бюл. № 12. – EDN CHPIOK.

9. *Лемонджав, В. Н.* Методологическое обеспечение разработки и технологической оптимизации приборов для подготовки донорских компонентов крови к трансфузии // *Приборостроение в XXI веке – 2022. Интеграция науки, образования и производства* : сб. материалов XVIII Всерос. науч.-техн. конф., Ижевск,

23–25 нояб. 2022 г. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 407–415. – EDN OTJFVF.

*V. N. Lemondzhava*¹ ✉, senior researcher

*A. D. Kasyanov*², CSc in medicine, leading researcher

E-mail: ooo.npo.biomedtech@mail.ru

¹Limited Liability Company “Scientific and Production Organization
“BIOMEDTECH”, Moscow

²Federal State Budgetary Institution “Russian Research Institute of Hematology
and Transfusiology of the Federal Medical and Biological Agency”, St. Petersburg

Evaluation of the Applicability of the Clauss Method of Measuring Fibrinogen Levels in Controlling Thawing of Fresh Frozen Donor Blood Plasma

The paper evaluated the applicability of the Clauss method of fibrinogen level measurement in the control of blood plasma thawing for qualitative verification of technological operation, as well as for quantitative comparison of the index values in the single-factor analysis of thawing modes. Examples of the influence of random error in the considered measurement task are shown.

Keywords: fibrinogen, blood plasma, Clauss measurement method.

УДК 620.179.16

В. В. Муравьев^{1,2}, д-р техн. наук, проф.

*А. С. Хомутов*¹, аспирант

Е. А. Степанова^{1,✉}, магистрант

*В. Д. Попова*¹, студент

E-mail: seaka00@mail.ru

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

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УРО РАН, г. Ижевск

Оценка неравномерности остаточных напряжений в стенках цилиндра глубинно-штангового насоса с использованием метода акустоупругости

Исследовано влияние операций поставки, отпуска и шлифовки на изменение остаточных напряжений в стенках цилиндра глубинно-штангового насоса с использованием метода акустоупругости. Выявлена неравномерность остаточных напряжений как по огибающей поверхности, так и по длине цилиндра.

Ключевые слова: остаточные напряжения, цилиндр глубинно-штангового насоса, акустоупругость.

Введение

Глубинно-штанговые насосы широко применяются в нефтяной промышленности для механизированной добычи нефти [1]. В процессе производства цилиндр глубинно-штангового насоса подвергается различным циклам механико-термической обработки, которые могут привести к образованию остаточных напряжений в стенках цилиндра, что повлияет на изменение геометрии, формы и появление дефектов.

На предприятии оценку внутренних остаточных напряжений производят при помощи методов расщепления и сегментирования, суть которых состоит в анализе глубокого разреза, нанесенного на деталь. Также используют метод пропилов, при котором на образце прорезают паз с заданным значением глубины [2].

При оценке остаточных напряжений чаще всего используется метод акустоупругости, основанный на анализе времени распространения ультразвуковых волн и коэффициентов упругоакустической связи материала [3].

Целью работы является исследование остаточных напряжений цилиндра глубинно-штангового насоса после разных стадий технологического процесса изготовления.

Материалы и методы

Исследованию подвергался цилиндр глубинно-штангового насоса с размерами $57,64 \times 43,65 \times 4450$ мм, изготовленный из стали нитраллой 38CrMoAl, после поставки, операции отпуска, процесса шлифовки и азотирования.

В ходе экспериментов получены эхограммы многократных отражений двух поперечных волн, распространяющихся во взаимноперпендикулярных направлениях по толщине стенки (рис. 1) на расстояниях 50, 210 и 370 см от торца цилиндра, снятых при помощи структуроскопа электромагнитно-акустического СЭМА с электромагнитно-акустическим преобразователем (ЭМАП). Анализировались многократно отраженные импульсы поперечных волн от внутренней поверхности цилиндра.

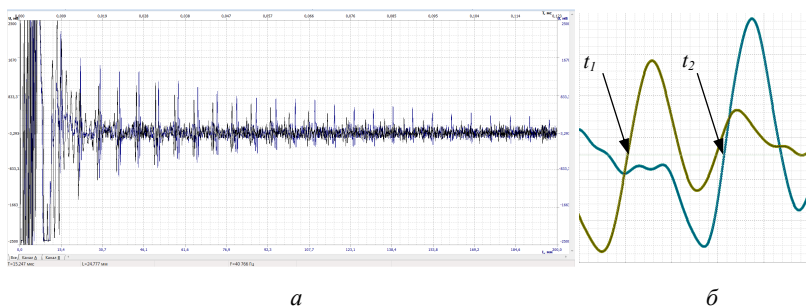


Рис. 1. Многократно отраженные импульсы поперечных волн по двум каналам (а), приближенные импульсы поперечных волн на первом отражении (б)

На каждом значении расстояния по длине трубы ЭМАП устанавливался в четырех положениях, соответствующих 0, 90, 180 и 270 градусам боковой поверхности цилиндра.

Для оценки остаточных напряжений цилиндра использовалась формула для случая одноосных напряжений по данным акустических значений:

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad (1)$$

где K – коэффициент упругоакустической связи материала конструкции ($K = -80$ ГПа); t_1, t_2 – время задержки импульса поперечной волны с перпендикулярными векторами поляризации между первым и третьим отражениями, мкс.

Расчет процентных отклонений остаточных напряжений произведен по формуле

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma - \sigma_{\text{ср}}}{\sigma_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где σ – рассчитанное значение остаточного напряжения по углу; $\sigma_{\text{ср}}$ – рассчитанное среднее значение остаточных напряжений по четырем углам.

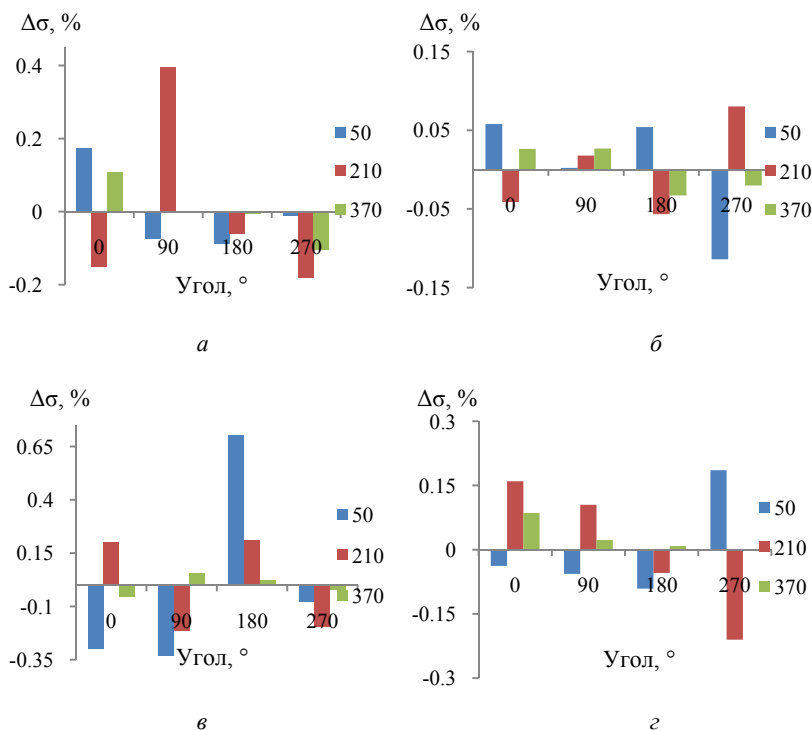


Рис. 2. Значения процентных отклонений остаточных напряжений цилиндра по четырем углам: при поставке (а), после операции отпуска (б), после операции шлифовки (в), после операции азотирования (г)

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены процентные отклонения остаточных напряжений цилиндра σ на расстояниях от торца трубы 50, 210 и 370 см в состоянии поставки, после операций отпуска, шлифовки и азотирования.

Наблюдается неравномерность значений процентных отклонений остаточных внутренних напряжений как по окружности, так и по длине цилиндра. Наименьшие изменения процентных отклонений остаточных напряжений наблюдаются после операций отпуска и азотирования, наибольшие – при поставке и шлифовке.

После всех циклов производства наблюдаются как растягивающие, так и сжимающие напряжения по окружности цилиндра. Максимальное процентное отклонение на этапе поставки – 0,39 %, на этапе отпуска – 0,11 %, на этапе шлифовки – 0,70 %, на этапе азотирования – 0,21 %.

Выводы

В ходе проведенных исследований получены значения процентного отклонения остаточных напряжений в стенке цилиндра глубинно-штангового насоса, отличающиеся как по окружности, так и по длине цилиндра.

Наблюдается значительное изменение остаточных напряжений по длине и по окружности цилиндра после таких технологических процессов изготовления, как поставка и шлифовка.

Список использованных источников и литературы

1. *Нужненко, С. А.* Добыча нефти штанговыми глубинно-насосными установками / С. А. Нужненко, Е. Ю. Герасименко // Достижения науки и образования. – 2020. – № 17 (71). – С. 14–18. – EDN JLOOLM.
2. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор) / А. Д. Монахов, Н. О. Яковлев, В. В. Автаев, Е. А. Котова // Труды ВИАМ. – 2021. – № 9 (103). – С. 95–104. – DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104. – EDN XNVHUD.
3. 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.

V. V. Murav'ev^{1,2}, DSc in engineering, professor

*A. S. Khomutov*¹, postgraduate student

E. A. Stepanova^{1,✉}, master student

*V. D. Popova*¹, bachelor

E-mail: seaka00@mail.ru

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

²Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Evaluation of Residual Stresses in the Cylinder Walls of a Deep-Rod Pump Using the Acoustoelasticity Method

The influence of delivery, tempering and grinding operations on the change of residual stresses in the cylinder walls of a deep-rod pump using the method of acoustoelasticity is investigated. The unevenness of residual stresses is revealed, both along the envelope surface and along the length of the cylinder.

Keywords: residual stresses, cylinder of the deep-rod pump, acoustoelasticity.

УДК 620.179.16

О. В. Муравьева^{1,2}, д-р техн. наук, проф.

*К. В. Колпаков*¹✉, аспирант

*Г. С. Хозяйкин*¹, магистрант

E-mail: rusapache@gmail.com

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

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Влияние механических напряжений на акустоупругие эффекты для нормальных волн в стальном листе при цилиндрическом изгибе

В статье приведены результаты определения коэффициентов акустоупругости для SH-волн и симметричных волн Лэмба моды S₀ в тонком стальном листе. Расчет коэффициентов производится путем сопоставления распределения внутренних напряжений, полученных при моделировании цилиндрического изгиба листа в программной среде COMSOL Multiphysics с экспериментальными значениями изменения скорости распространения волн при изгибе листа. При исследовании использовались пьезопреобразователи с сухим точечным контактом, которые переставлялись по окружности радиусом 40 см от 0 до 180° с шагом 15°.

Ключевые слова: SH-волны, нормальные волны, скорость, акустоупругие коэффициенты, напряжение, анизотропия.

Введение

В основе ультразвукового метода определения внутренних напряжений лежит коэффициент акустоупругости k . Он состоит в зависимости скорости распространения ультразвуковой волны C от величины механических напряжений σ в объекте контроля [1].

Для вычисления коэффициента акустоупругости используется формула

$$k = \frac{\Delta C}{C_0} \frac{1}{\sigma}, \quad (1)$$

где ΔC – изменение скорости распространения волны после приложения напряжений; C_0 – скорость в ненагруженном состоянии.

© Муравьева О. В., Колпаков К. В., Хозяйкин Г. С., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252>.

Значение данного коэффициента зависит от того, под каким углом к направлению действия напряжений распространяется ультразвуковая волна, и от типа волны, так как значение имеет направление поляризации волны. Для случая изгиба пластин величина коэффициентов на сторонах, испытывающих растяжение и сжатие, будет примерно одинакова, но различна по знаку [2, 3].

Результаты моделирования

При моделировании нагрузки в программной среде COMSOL Multiphysics было получено распределение внутренних напряжений в листе. График среднего напряжения по Мизесу (von Mises stress) по путям следования волн в зависимости от направления при различных прогибах показан на рис. 1. Разным цветом показана величина смещения центра листа от прямого положения. Прогиб 45 мм соответствует цилиндрическому изгибу радиусом 1340 мм, прогиб 90 мм: $R = 660$ мм, прогиб 135 мм: $R = 425$ мм, прогиб 180 мм: $R = 300$ мм. Из-за неидеальности моделирования радиус изгиба не является равномерным: при прогибе в 180 мм по центру листа радиус равен заявленному 300 мм, а по краям $R = 306,5$ мм, что составляет 2 % отклонение от заявленного. Данное отклонение можно считать допустимым.

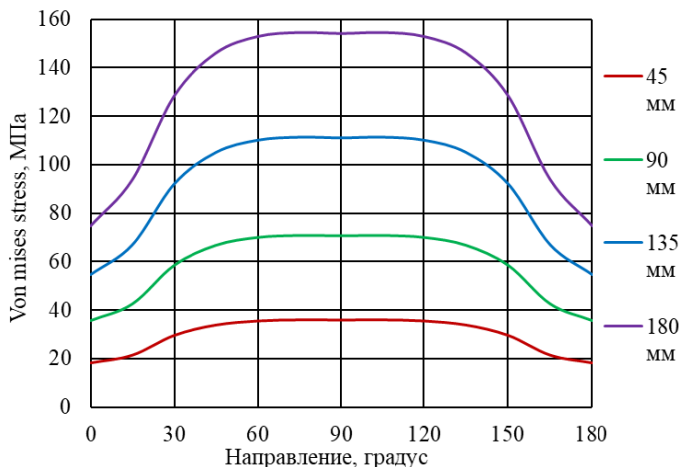


Рис. 1. Среднее значение напряжения на пути следования волны

Экспериментальные исследования

При выполнении эксперимента лист изгибался до тех же радиусов, что и при моделировании: $R = 300$ мм (прогиб 180 мм), $R = 425$ мм (прогиб 135 мм), $R = 660$ мм (прогиб 90 мм), $R = 1340$ мм (прогиб 45 мм), $R = \infty$ (прогиб 0 мм). Зависимость скорости волн Лэмба и SH-волн от направления при различных прогибах показана на рис. 2.

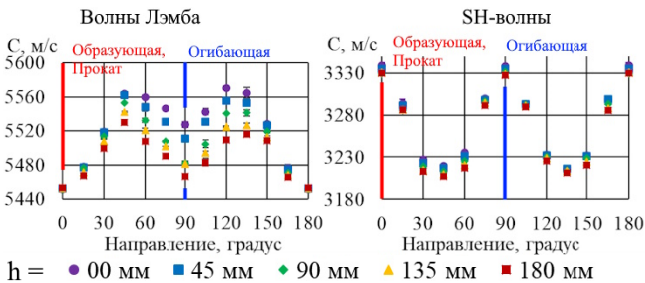


Рис. 2. Зависимость скорости волн Лэмба от направления при различных прогибах

Результаты и их обсуждение

Сопоставляя снижения скорости от изгиба листа с напряжениями, полученными при моделировании, можно получить график анизотропии акустоупругости.

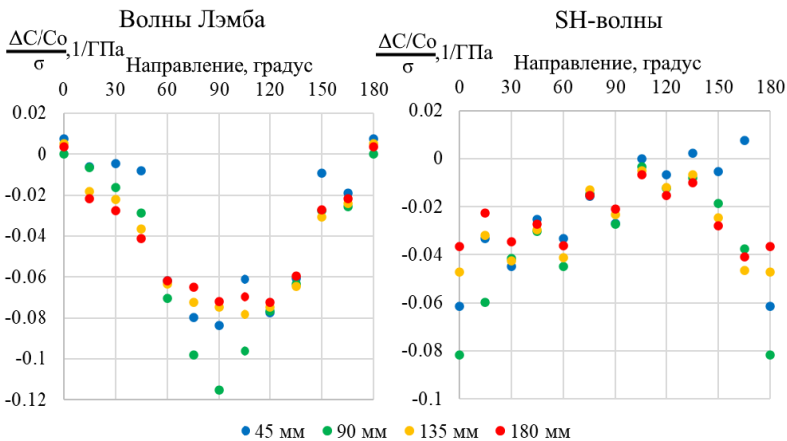


Рис. 3. Коэффициенты акустоупругости волн Лэмба и SH-волн в различных направлениях

На рис. 3 видно, что коэффициенты акустоупругости волн Лэмба равны нулю в направлении образующей цилиндра при изгибе (0 и 180°) и линейно возрастают при развороте в направлении огибающей (90°). SH-волны имеют более равномерное распределение акустоупругости, и ее максимальное значение гораздо меньше, чем для волн Лэмба.

Выводы

Максимальные значения акустоупругих коэффициентов для SH-волн и для симметричных волн Лэмба моды S0 расположены на двух взаимно перпендикулярных направлениях: 90° для волн Лэмба и 0° (180°) для SH-волн. Это связано с направлением поляризации волн. При его совпадении с направлением наибольших напряжений наблюдается наибольшее изменение скорости при изгибе листа, а когда направления поляризации и напряжений перпендикулярны, скорость распространения волн практически не изменяется.

Согласно полученным результатам экспериментальных измерений скорость обоих типов исследуемых волн при изгибе тонкого стального листа снижается. Максимальные значения акустоупругого коэффициента достигают $-0,115$ 1/ГПа для волн Лэмба и $-0,082$ 1/ГПа для SH-волн.

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, вып. 1. – С. 42–52. – EDN ZAKPZR.
2. Курашкин, К. В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале // Акустический журнал. – 2019. – Т. 65, № 3. – С. 382–388. – EDN GESKUS.
3. Pei, N. Comparison of acoustoelastic Lamb wave propagation in stressed plates for different measurement orientations / N. Pei, L. J. Bond // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2017. – Vol. 142, no. 4. – Pp. 327-331. – DOI: 10.1121/1.5004388.

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

*K. V. Kolpakov*¹✉, postgraduate student

*G. S. Khozyaikin*¹, master student

E-mail: rusapache@gmail.com

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk


²Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Influence of Mechanical Stresses on Acoustoelastic Effects for Guided Waves in a Steel Sheet Under Cylindrical Bending

The article presents the results of determining the acoustoelasticity coefficients for SH waves and symmetric Lamb waves of the S0 mode in a thin steel sheet. The coefficients are calculated by comparing the distribution of internal stresses obtained by modeling cylindrical bending of a sheet in the COMSOL Multiphysics software environment with experimental values of changes in the speed of wave propagation during sheet bending. The study used piezoelectric transducers with dry point contact, which were rearranged around a circle with a radius of 40 cm from 0 to 180° in increments of 15°.

Keywords: SH waves, normal waves, velocity, acoustoelastic coefficients, stress, anisotropy.

УДК 620.179.16

О. В. Муравьева^{1,2} , д-р техн. наук, проф.

*А. А. Наговицын*¹, аспирант

E-mail: pmkk@istu.ru

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

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

О неравномерности акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя

В работе теоретически и экспериментально исследована неравномерность акустического поля ЭМА-преобразователя поперечных волн. Основываясь на информативных параметрах дисперсии серии многократных отражений, а также моделирования было выявлено, что между результатами моделирования и эксперимента наблюдается корреляция.

Ключевые слова: акустические поля электромагнитно-акустических преобразователей, поперечная волна.

Введение

Известно, что электромагнитные акустические преобразователи (ЭМАП) занимают особое место в акустических методах неразрушающего контроля благодаря тому, что контроль осуществляется через воздушный зазор при высоких температурах и без использования контактных жидкостей (бесконтактно), а также благодаря возможности возбуждения и приема всех типов волн, включая поперечные волны горизонтальной поляризации, которые практически невозможно возбудить и принять контактными методами [1].

Основным недостатком ЭМАП является относительно низкая чувствительность. Это привело к возобновлению интереса к изучению свойств, важных для применения и проектирования ЭМАП. К числу таких характеристик относится акустическое поле, формируемое ЭМАП, основные параметры которого зависят от чувствительности, погрешности глубиномера, поперечной разрешающей способности

© Муравьева О. В., Наговицын А. А., 2024

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).

и других параметров, поскольку грамотное формирование акустического поля может компенсировать низкий коэффициент ЭМА-преобразования. Формирование диаграммы направленности ЭМАП в существенной мере определяется распределением вихревых токов, формируемых в приповерхностном слое электропроводящего объекта контроля, и всегда полагается, что ЭМАП дает симметричную диаграмму направленности. Однако в присутствии дефекта в объекте контроля акустическое поле может менять свой характер [2–3].

На сегодняшний момент практически отсутствуют исследования неравномерности акустического поля, что повышает актуальность исследования.

Используемые подходы

Для реализации зеркально-теневого метода на многократных отражениях были использованы специализированные бесконтактные ЭМА-преобразователи проходного типа, которые обеспечивают излучение-прием поперечных с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях по сечению цилиндрического образца. Результатом измерений являются осциллограммы серии многократных отражений волны по диаметру образца. Причем осциллограммы для дефектного участка образца характеризуется резким ослаблением серии многократных отражений.

В качестве образца для оценки неравномерности акустического поля был выбран пруток из стали 60С2А диаметром $D = 12$ мм с искусственным дефектом в виде плоскодонного отверстия $d = 3$ мм и глубиной залегания $h = 6$ мм.

Для оценки неравномерности акустического поля анализировалась такая вероятностно-статистическая характеристика, как дисперсия D , взятая из осциллограмм серий многократных отражений, рассчитанная в специализированном программном обеспечении «ПРИНЦ» дефектоскопа ДЭМА [4].

$$D = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} (x_n - m)^2, \quad (1)$$

где K – количество данных в массиве x_n (определяется диаметром объекта и числом анализируемых отражений); m – математическое ожидание.

Анализ акустических и электромагнитных полей ЭМА-преобразователей ведется, как правило, с использованием численных методов. С целью подтверждения результатов экспериментального исследования проведено моделирование электромагнитного поля ЭМА-преобразова-

теля численным методом в программной среде Comsol Multyphysics и модуля AC/DC.

Исследовались два случая однополярного импульса тока, подаваемого на высокочастотный индуктор: с положительным (I^+) и отрицательным (I^-) значением тока. В случае положительного значения тока I^+ , подаваемого на высокочастотный индуктор и направленного по часовой стрелке, на поверхности образца наводятся вихревые токи, ориентированные против часовой стрелки. При этом создается дополнительное магнитное поле, сонаправленное с магнитным полем системы подмагничивания. И, наоборот, при отрицательном токе в высокочастотном индукторе (I^-), направленном против часовой стрелки, создаваемое индуктором магнитное поле будет иметь противоположное направление с магнитным полем системы подмагничивания [4].

Результаты и их обсуждение

Для анализа вероятностно-статистических характеристик был выбран массив данных, равный 25 отражениям, а расчет производился за счет модуля «Статистика» в ПО «ПРИНЦ» (рис. 1, *a*).

В ходе моделирования исследовались поля вихревых токов (рис. 1, *б*), формируемых высокочастотным индуктором в динамическом режиме (в условиях дополнительного воздействия током высокочастотного индуктора) при сонаправленном (I^+) и противонаправленном (I^-) подключениях индуктора в цилиндрическом образце 60С2А.

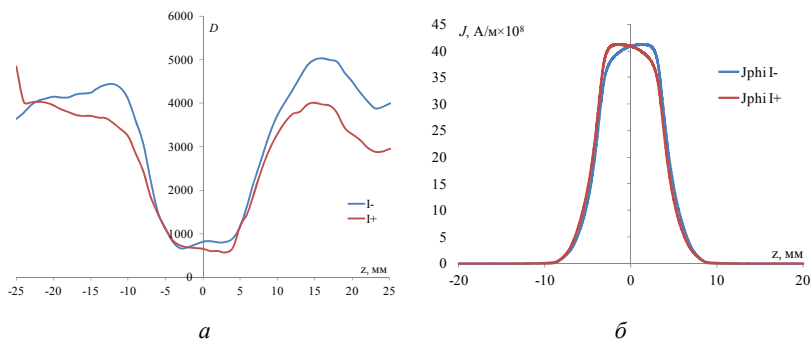


Рис. 1. Графики дисперсии серии многократных отражений, полученные при эксперименте (*a*), и плотности вихревых токов J (*б*), построенные вдоль поверхности объекта (z) в момент времени, соответствующий максимальному значению плотности вихревых токов поперечного ЭМАП, полученные при помощи моделирования


В случае ЭМАП поперечных волн при проведении эксперимента наблюдается асимметрия в зоне дефекта, где при сонаправленном ($I+$) подключении перепад идет в одну сторону, а при противоположном ($I-$) подключении – в противоположную. Данная тенденция наблюдается и при моделировании полей вихревых токов, где дефект отсутствует. Это связано с взаимодействием магнитного поля и вихревого поля, где на изменение стороны перепада влияет смена полярности импульса тока, подаваемого на высокочастотный индуктор.

Выводы

Таким образом, в работе теоретически и экспериментально исследована неравномерность акустического поля ЭМА-преобразователя поперечных волн. Основываясь на информативном параметре дисперсии серии многократных отражений и моделировании, было выявлено, что между результатами моделирования и эксперимента наблюдается корреляция. Выявлена асимметрия в зоне дефекта, где при сонаправленном ($I+$) подключении перепад идет в одну сторону, а при противоположном ($I-$) подключении – в противоположную. Это связано с взаимодействием магнитного поля и вихревого поля, где на изменение стороны перепада влияет смена полярности импульса тока, подаваемого на высокочастотный индуктор.

Список использованных источников и литературы

1. *Hirao, M.* Electromagnetic Acoustic Transducers / M. Hirao, H. Ogi // Springer. – 2017. – 360 p. – DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4.
2. *Толупов, Х. Б.* Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 71–74.
3. Development of an omni-directional magnetic-concentrator-type electromagnetic acoustic transducer / Z. Liu, L. Deng, Y. Zhang, A. Li, W. Bin, C. He // NDT & E International. – 2020. – Vol. 109. – P. 102193. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.10219.
4. *Муравьева, О. В.* К вопросу о повышении эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн / О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. А. Наговицын // Дефектоскопия. – 2023. – № 3. – С. 3–13. – DOI: 10.31857/S0130308223030016. – EDN OOQZWK.

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

*A. A. Nagovitsyn*¹, postgraduate student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

On the Non-Uniformity of the Acoustic Field of a Pass-Through Electromagnetic-Acoustic Transducer

In this paper, the non-uniformity of the acoustic field of an EMA transverse wave transducer is theoretically and experimentally investigated. Based on the informative parameters of the dispersion of a series of multiple reflections, as well as modeling, it was found that there is a correlation between the results of modeling and experiment.

Keywords: acoustic fields of electromagnetic-acoustic transducers, transverse wave.

УДК 620.179.16

О. В. Муравьева^{1,2} ✉, д-р техн. наук, проф.

*А. С. Хомутов*¹, аспирант

*К. А. Торхов*¹, аспирант

*А. Л. Владыкин*¹, аспирант

*К. Ю. Белослудцев*¹, магистрант

*А. Д. Наумов*¹, студент

*А. А. Безносков*¹, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

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

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Методика оценки интегральной неравномерности толщины стенки цилиндра глубинно-штангового насоса акустическим методом

Предложена акустическая методика оценки интегральной неоднородности толщины стенки трубы малого диаметра. Методика основана на регистрации донных отражений по толщине по всему периметру трубы и реализована с использованием гибких пьезопреобразователей на основе пьезопленки типа ПВДФ.

Ключевые слова: неравномерность толщины стенки, цилиндр штангового глубинного насоса, акустический метод.

Введение

Трубы малого диаметра нашли широкое распространение в нефтедобывающей промышленности, в частности для цилиндров и плунжеров штанговых глубинных насосов (ШГН). К последним предъявляются жесткие требования соблюдения геометрии наружных и внутренних диаметров и толщины стенки трубы. Для измерения наружных диаметров, как правило, используются методы визуально-измерительного контроля. Контроль внутренних диаметров цилиндров ШГН ведется с использованием пневмоэлектронного контрольно-измерительного комплекса «Аэротест-ШГН» [1].

© Муравьева О. В., Хомутов А. С., Торхов К. А., Владыкин А. Л., Белослудцев К. Ю., Наумов А. Д., Безносков А. А., 2024

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).

При определении толщины стенки трубы, как правило, используются методы ультразвуковой толщинометрии [2, 3]. Использование УЗ-толщинометрии при контроле труб малого диаметра сопряжено со сложностью обеспечения надежного акустического контакта плоской поверхности преобразователя с цилиндрической поверхностью трубы [2], а также недостаточной производительностью, обусловленной необходимостью сканирования трубы при поступательно-вращательном движении.

В работе предложена методика интегральной оценки неравномерности толщины стенки цилиндра ШГН с использованием акустического метода и специализированных гибких пьезопреобразователей.

Материалы и методы

Объектами контроля являются образцы, вырезанные из цилиндров ШГН с внешним диаметром 57 мм и толщиной стенки 6 мм с азотированной внутренней поверхностью. Часть образцов была забракована по недопустимому отклонению внутреннего диаметра с дефектами «кольцо» и «эллипс» с использованием контрольно-измерительного комплекса «Аэротест-ШГН».

Акустические измерения проводились с использованием гибких пьезопленок на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) [4], размещаемых интегрально по всему периметру образца (рис.1, а) либо локально (по зонам) (рис.1, б). Возбуждение и прием продольных волн по толщине стенки трубы осуществлялся с использованием дефектоскопа DIO1000-РА.

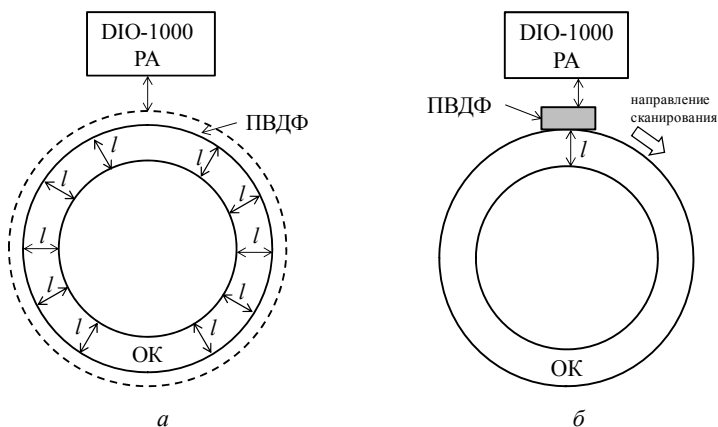


Рис. 1. Схема интегрального (а) и локального (б) прозвучивания по толщине стенки трубы

Результаты и обсуждение

Серия импульсов многократных отражений в результате интегрального прозвучивания образца для однородной (*a*) и неоднородной (*б*) толщины стенки представлены на рис. 2. В отличие от равномерной толщины стенки, для неравномерной толщины стенки наблюдается рассогласование импульсов по времени, увеличивающееся по мере увеличения количества отражений. Степень неравномерности толщины стенки трубы Δ может быть оценена по формуле

$$\Delta = C_l \left(\frac{(t_2 - t_1) - (t_{2,1} - t_{1,1})}{8000} \right), \quad (1)$$

где C_l – скорость продольной волны в материале; t_2, t_1 – время пятого и первого импульса основного сигнала; $t_{2,1}, t_{1,1}$ – время пятого и первого импульса рассогласованного сигнала.

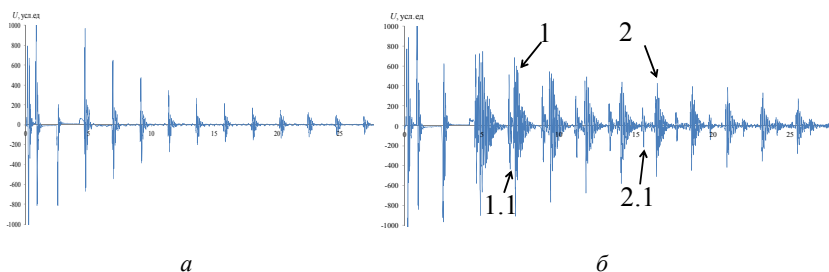


Рис. 2. Эхограмма многократных донных переотражений при равномерной (*a*) и неравномерной (*б*) толщине стенки образца

Результаты расчетов показали, что при толщине стенки трубы 6,6 мм неравномерность толщины стенки интегральным методом составила 0,36 мм (или 5,45 %). При этом результаты локальных измерений толщины стенки показали, что максимальная разница между максимальной и минимальной толщиной стенки составила 0,4 мм (или 6,06 %), что подтверждает результаты интегральной толщинометрии. Исследование второго образца показало, что неравномерность стенки не превышает 0,04 мм. Соотношение между основным (1) и рассогласованными (2) импульсами свидетельствует о том, что основная часть периметра трубы обладает существенной неравномерностью основной толщины стенки.

При сканировании стандартным локальным методом получили следующие результаты: толщина стенки в месте несогласования импульсов


имеет неравномерность стенки 0,4 мм, а в другом случае неравномерность стенки составила 0,04 мм.

Выводы

Разработанная методика позволяет оценить степень неравномерности толщины стенки трубы интегральным методом с использованием гибкого пьезопреобразователя и реализуется за счет поступательного движения трубы относительно преобразователя, существенно увеличивая производительность контроля относительно локального метода.

Список использованных источников и литературы

1. *Мурашов, В. М.* Пневмоэлектронные длиномеры манометрического типа «Аэротест 1/2 ДЦ» // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 11. – С. 55–58. – EDN HVHEJV.
2. Ультразвуковая система контроля толщины стенки и коррозионных повреждений тонкостенных труб / Б. Ф. Ануфриев, А. Н. Аблеев, С. П. Мартыненко, С. С. Мартыненко // Датчики и системы. – 2021. – № 5 (258). – С. 10–14. – DOI: 10.25728/datsys.2021.5.2. – EDN YENNYS.
3. A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection / Tianhao Liu, Cuixiang Pei, Rui Cai, Yong Li, Zhenmao Chen // Sensors and Actuators A: Physical – 2020. – Vol. 134. – DOI: 10.1016/j.sna.2020.112213.
4. Акустическая структуроскопия медных образцов после равноканального углового прессования / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, С. В. Леньков [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 6. – С. 31–38. – DOI: 10.31044/1814-4632-2023-6-31-38. – EDN GOWOPY.

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

*A. S. Khomutov*¹, postgraduate student

*K.A. Torkhov*¹, postgraduate student

*A. L. Vladykin*¹, postgraduate student

*K. Y. Belosludcev*¹, master student

*A. D. Naumov*¹, student

*A. A. Beznosov*¹, student

E-mail: pmkk@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

**The Method of Estimating the Integral Unevenness
of the Cylinder Wall Thickness of the Deep-Rod Pump
by the Acoustic Method**

An acoustic method for estimating the integral inhomogeneity of the wall thickness of a small diameter pipe is proposed. The technique is based on the registration of bottom reflections in thickness along the entire perimeter of the pipe and is implemented using flexible piezoelectric converters based on a PVDF-type piezo film.

Keywords: the unevenness of the wall thickness, the cylinder of the rod depth pump, acoustic method.

УДК 620.179.162

О. В. Муравьева^{1,2, ✉^a}, д-р техн. наук, проф.

П. А. Шихарев^{1, ✉^b}, аспирант

E-mail: ^a*kafedra@istu.ru*, ^b*pashaplay@istu.ru*

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

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Оценка неравномерности акустических свойств по длине пружины автомобильной подвески

В статье представлен акустический метод оценки неравномерности акустических свойств пружины автомобильной подвески. Метод основан на измерении скорости и частоты акустических волн и анализе их изменений вдоль пружины. Это позволяет обнаружить дефекты и зоны с неравномерностью акустических свойств для повышения качества автомобильных пружин и обеспечения безопасности движения.

Ключевые слова: акустические свойства, оценка неравномерности, контроль пружин.

Введение

Автомобильная подвеска является ключевым элементом безопасности и комфорта при движении автомобиля. Важной составляющей этого механизма являются пружины, которые обеспечивают амортизацию и стабильность автомобиля на дороге. Одной из характеристик пружин, определяющих их качество, является равномерность акустических свойств [1].

Неравномерность акустических свойств пружины автомобильной подвески может привести к возникновению резонансных колебаний, которые могут негативно сказаться на работе подвески и управляемости автомобиля. В связи с этим оценка акустических свойств пружин является актуальной задачей [2].

Одним из методов неразрушающего контроля, который может быть использован для контроля пружин, является зеркально-теневого метод многократных отражений. Объемные волны могут быть использованы для исследования состояния пружин. Например, они могут быть приме-

© Муравьева О. В., Шихарев П. А., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252>.

нены для обнаружения трещин, коррозии, износа и других дефектов. Для этого используются различные методы, такие как ультразвуковая дефектоскопия, радиографическая инспекция, акустическая эмиссия и т. д. [3].

Материалы и методы

В качестве объекта контроля в данной работе выступает пружина сжатия заднего амортизатора автомобиля, изготовленная методом холодной навивки. Пружина имеет диаметр прутка 12 см, высоту 34 см, 5 витков разного диаметра с шагом 8–9 см.

Для оценки неравномерности акустических свойств пружины по ее длине необходимо провести несколько измерений на разных участках пружины. Измерения проводятся на одинаковом расстоянии, равном 2 см, друг от друга по всей длине пружины в 87 точках. Исследование неравномерности акустических свойств пружины проводилось при помощи двух типов объемных акустических волн – продольной C_l и поперечной C_t . Возбуждение продольной волны осуществлялось при помощи датчика на основе пленки из поливинилиденфторида (ПВДФ), работающего на частоте 10 МГц. Возбуждение поперечной волны производилось при помощи элетромагнитно-акустического преобразователя, работающего на частоте порядка 2,5 МГц [4].

Результаты и обсуждение

Для расчета радиуса пружины было проведено ее сканирование при помощи лазерного 3D-сканера.

В программной среде «Компас-3D» полученная модель была разбита на равные участки по 2 см, в которых рассчитывался радиус пружины. Радиус пружины изменяется в диапазоне 47,06–71,91 мм. Зависимость скорости продольной волны от радиуса пружины приведена на рис. 1.

В ходе эксперимента было установлено, что акустические свойства пружины изменяются неравномерно по отношению к ее длине. С большей степенью вероятности это связано с наличием в пружине напряженно-деформированного состояния с остаточными напряжениями на поверхности пружины, которое создается в процессе изготовления пружины на этапе упрочняющих операций.

По полученным измеренным данным скоростей продольной и поперечной волн рассчитаны упругие модули. На рис. 2 приведено распределение коэффициента Пуассона по длине пружины.

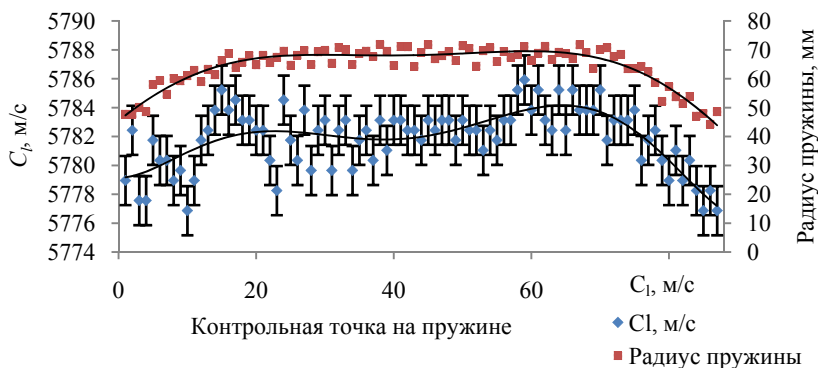


Рис. 1. Скорость продольной волны относительно радиуса пружины в каждой контрольной точке

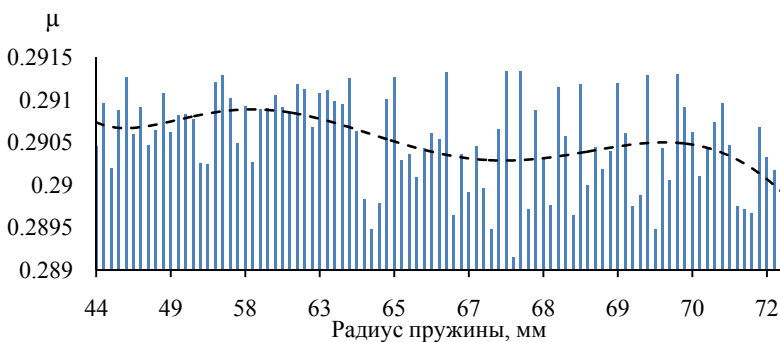


Рис. 2. Распределение коэффициента Пуассона в каждой измеряемой точке пружины

Заключение

В данной статье представлен результат исследования неравномерности акустических свойств пружины автомобильной подвески зеркально-теневым методом многократных отражений. Результаты исследования показали, что акустические свойства пружины могут изменяться неравномерно в зависимости от радиуса пружины.

Список использованных источников и литературы

1. Харитонов, В. А. Современное состояние и направления совершенствования технологических процессов изготовления закаленно-отпущенной пружинной проволоки / В. А. Харитонов, Н. Ю. Сметнева // Черная металлургия. – 2021. – № 10. – С. 1060–1065. – EDN PPCRMD.
2. Титов, А. В. Оценка механических свойств исходного материала пружинного производства методом акустической эмиссии // Металлообработка. – 2013. – № 2 (74). – С. 35–41. – EDN REKXKF.
3. Оценка параметров качества винтовой пружины сжатия из стали 65с2ва акустическими методами / Д. А. Беспалов, М. Ю. Силаев, В. В. Ворошилин, Е. Ю. Ремшев // Металлообработка. – 2014. – № 3 (81). – С. 51–54. – EDN SLJFER.
4. 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. – EDN BQEKGO.

O. V. Muravyeva^{1,2,✉^a}, DSc in engineering, professor

P. A. Shikharev^{1,✉^b}, postgraduate student

Email: ^akafedra@istu.ru, ^bpashaplay@istu.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Evaluation of the Unevenness of Acoustic Properties along the Length of the Car Suspension Spring

This article presents an acoustic method for evaluating the uneven acoustic properties of an automobile suspension spring. The method is based on measuring the speed and frequency of acoustic waves, and analyzing their changes along the spring. This makes it possible to detect defects and areas with uneven acoustic properties to improve the quality of auto-mobile springs and ensure traffic safety.

Keywords: acoustic properties, evaluation of unevenness, control of springs.

УДК 534.221+004.942

С. А. Мурашов^{✉ a}, канд. техн. наук, доц.

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.

М. А. Агеев, магистрант

А. А. Безносков, студент

E-mail: ^a sm-ii@yandex.ru

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

Особенности моделирования распространения упругих волн Лэмба в пластине под действием деформирующей статической нагрузки в среде COMSOL Multiphysics

В статье представлен подход к объемному моделированию методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics 6.1 распространения упругих волн в пластинах, находящихся под действием заданной статической нагрузки, приводящей к сложному напряженно-деформированному состоянию пластины, на примере однопериодного гармонического импульса нулевой симметричной моды s_0 волн Лэмба. Акустоупругие свойства материала задаются через постоянные уравнения Мурнагана. Предложенный подход позволяет моделировать процессы распространения упругих волн в листах или трубах большого диаметра, находящихся в напряженно-деформированном состоянии и может быть полезным для исследований в области неразрушающего контроля, тензометрии, структурокопии.

Ключевые слова: волны Лэмба, распространение упругих волн, метод конечных элементов, COMSOL Multiphysics, напряженно-деформированное состояние, акустический волноводный неразрушающий контроль

Введение

Волноводный акустический контроль традиционно применяется для дефектоскопии материалов, обладающих геометрическими свойствами механического волновода – в форме листа (малая толщина при многократно больших длине и ширине) или в форме стержня (например, сортовой и трубный прокат) [1–4]. Известно, что волны Лэмба, распространяющиеся в листах, могут быть использованы для оценки анизотропии

© Мурашов С. А., Волкова Л. В., Агеев М. А., Безносков А. А., 2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/>).

свойств материала [5–8]. Ряд исследований [9–11] показывает, что напряженно-деформированное состояние объекта контроля оказывает влияние на скорость распространения волн Лэмба (акустопругий эффект), которая, кроме того, обладает свойством дисперсии при изменении частоты волн или толщины пластины, геометрии (например, изогнутая форма пластины), структуры материала (текстурная анизотропия).

При обработке экспериментальных данных измерения анизотропии скорости волн Лэмба в стальных листах существует потребность в отстройке от факторов, влияющих на изменение скорости волн Лэмба, не связанных с текстурной анизотропией. И, напротив, в задачах оценки напряженно-деформированного состояния требуется учесть влияние акустопругого эффекта, отстраиваясь от влияния структуры и исходной геометрии листа в случаях, когда он не является плоским. Метод конечных элементов позволяет численно моделировать сложные напряженно-деформированные состояния и исследовать процессы распространения упругих волн в телах различной геометрии. В статье рассматривается подход к решению такого рода задач в среде COMSOL Multiphysics на примере металлических листов, испытывающих нагружение на изгиб.

Параметры конечно-элементной модели

Геометрия объекта исследования представляет собой лист размерами 250×250 мм в плоскости xu и толщиной 8 мм по оси z (рис. 1). Начало координат находится в центре листа и лежит на его «верхней» поверхности. Область под излучающим преобразователем (апертура) задается в форме цилиндра диаметром 17 мм, ось которого проходит через начало координат в направлении оси z . Вдоль оси x (в одном из направлений распространения волны) размещены точки для измерения смещений.

Физическая модель построена с использованием модуля Solid Mechanics с дополнительной опцией поддержки гиперупругих материалов (“Hyperelastic materials”), а именно моделью нелинейного упругого материала по Мурнагану – “Murnaghan”, описываемой уравнением [12]:

$$\Phi = \frac{\Lambda + 2\mu}{2} I_1^2(\varepsilon) - 2\mu I_2(\varepsilon) + \frac{l + 2m}{3} I_1^3(\varepsilon) - 2m I_1(\varepsilon) I_2(\varepsilon) + n I_3(\varepsilon), \quad (1)$$

где Φ – потенциал Мурнагана; Λ и μ – постоянные Ламе; $I_i(\varepsilon)$ – главные инварианты тензора деформации Грина ($i = 1, 2, 3$); l, m, n – постоянные Мурнагана.

При моделировании материал листа задан как изотропный – сталь «Structured steel» из библиотеки материалов со следующими упругими характеристиками при нормальных условиях: модуль Юнга $E = 205$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$, плотность $\rho = 7850$ кг/м³, постоянные Мурагана: $l = -3 \cdot 10^{11}$ Па, $m = -6,2 \cdot 10^{11}$ Па, $n = -7,2 \cdot 10^{11}$ Па. Расчетные значения: модуль сдвига $G = 80,1$ ГПа, скорость продольных волн $C_l = 5778$ м/с, скорость поперечных волн $C_t = 3193,9$ м/с.

Статическое нагружение изогнутого листа реализовано постоянным давлением $F_S = 1$ МН/м², приложенным в направлении оси z к поперечному сечению листа в плоскости yz при $x = 0$ (середина листа) за исключением области источника волн. На рис. 1 эта плоскость показана синим цветом. Ребра, расположенные слева и справа по оси x от нагрузки на «верхней» стороне листа, жестко закреплены, одно из них имеет свободную ось x .

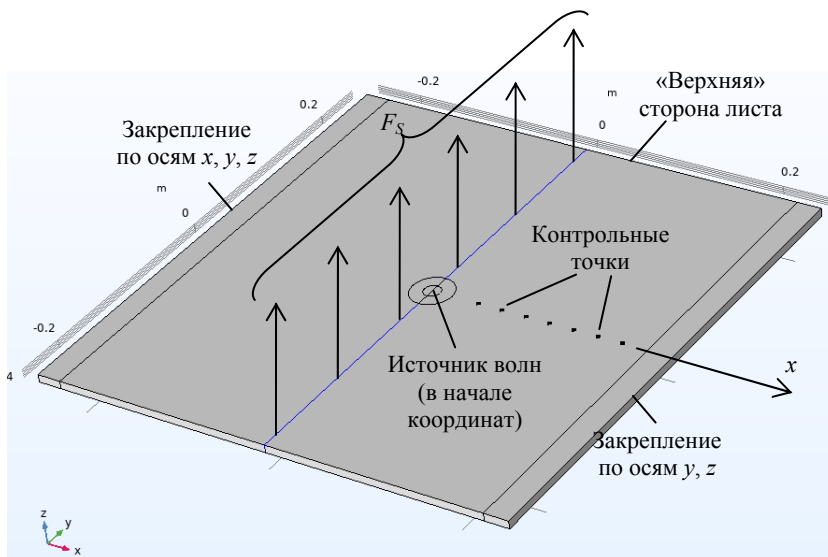


Рис. 1. Геометрия листа и механическая модель его статического нагружения

Для получения идеальной формы волнового фронта зона возбуждения волн Лэмба представляет собой цилиндрический объем, геометрически выделенный в центре листа. Моделировать сам электроакустический преобразователь нет необходимости. Под действием силы $F(t)$, приложенной в противоположных направлениях к верхней и нижней

поверхностям цилиндра, источник совершает импульсные колебания растяжения-сжатия по оси z частотой $f = 78$ кГц, в результате чего в листе формируется мода s_0 волн Лэмба. Временная функция возбуждения $F(t)$ имеет вид одного периода синусоидальной функции

$$F(t) = A \sin(\omega t), \quad (2)$$

где $A = 10^4$ Н/м² – амплитудный параметр; ω – круговая частота; t – время. Для лучшей сходимости в процессе расчета вблизи границ функции $F(t)$ опционально можно включить сглаживание, вычисляемое из условия непрерывности второй производной по времени.

Линейный размер конечных элементов задается исходя из оценочной длины волны $\lambda \approx 68$ мм в диапазоне от $\lambda/20$ до $\lambda/10$, сама сетка из тетраэдров строится в автоматическом режиме. Созданные на этапе построения геометрии контрольные точки оказываются в узлах сетки, что снижает величину ошибок при интерполяции физических полей.

Шаг по времени Δt выбирается с учетом критерия Куранта – Фридрикса – Леви ($CFL < 1$) из соотношения

$$\Delta t = \frac{CFL \cdot T}{N}, \quad (3)$$

где $CFL = 0,1$; T – период импульса возбуждения; N – количество конечных элементов, приходящихся на одну длину волны λ (если исходить из наименьшего размера $0,05\lambda$ конечного элемента, то $N = 20$). Таким образом, на один период T приходится порядка 200 временных отсчетов $\Delta t \approx 64$ нс (для постобработки удобно округлить до $\Delta t = 50$ нс). Для уменьшения погрешностей дискретизации в настройках Solid Mechanics можно увеличить степень полиномов аппроксимации до 3, тип дискретизации «Cubic Lagrange» (но время расчета увеличивается в 2–3 раза).

Этапы расчета модели

Преднагружение листа решается в статической постановке (Study / Static) – это первый шаг расчета. Результаты вычислений представляются в виде полей механических напряжений, смещений и деформаций, возникающих под действием постоянной нагрузки.

На втором шаге решается динамическая задача расчета во временной области (Study / Time Dependent) процесса распространения волн. Для этого подойдет динамический решатель PARDISO, предлагаемый по умолчанию. В настройках разделов Study опция “Include geometric nonlinearity” уже будет установлена при использовании блока

“Hyperelastic Material” модуля Solid Mechanics. Условия статического нагружения должны быть заданы также и на шаге 2 без изменения.

После расчета модели на заданном временном интервале (например, от 0 до $4T$, где T – период колебаний источника) при анализе результатов потребуется выделить смещения в упругой волне на фоне смещений статического нагружения, которые могут иметь заметно большие значения. Для этого в разделе Results / Datasets можно создать элемент Join, с помощью которого из решений, полученных на шаге 2 для всех рассчитанных моментов времени, вычтеть решение, полученное на шаге 1 или на этом же шаге 2, но в момент времени $t = 0$. Альтернативно, вместо использования Join можно в качестве шага 3 установить элемент Combine Solutions, в параметрах которого указать вычитание результатов шага 1 из результатов шага 2.

Если требуется исследовать распространение волн под влиянием только деформированной в результате нагружения геометрии, но без учета механических напряжений, то добавление в дерево компонента модели элемента Deformed Geometry / Deforming Domain позволит после выполнения шага 1 экспортировать результирующую деформированную сетку конечных элементов из раздела Results / Datasets / Study в двоичный или текстовый файл для последующего импорта и построения новой геометрии (как в новом компоненте этой же модели, так и в отдельной модели), а также напрямую направить новую сетку в исходное дерево текущей модели (без экспорта в файл).

Результаты и их обсуждение

В результате деформирования пластины ее длина увеличивается, а середина смещается по оси x . Для сопоставимости результатов, полученных до нагружения и в напряженно-деформированном состоянии, имеет смысл использовать систему координат “Material (X, Y, Z)”, привязанную к исходной геометрии, – длина листа, выраженная в этих координатах, остается постоянной, тем самым устраняется геометрическое влияние деформации на оценку скорости волны. В случаях, когда влияние деформации нужно учесть, следует использовать пространственную систему координат “Spatial (x, y, z)”. В рассматриваемом случае удлинение «верхней» поверхности листа по оси x составляет $7,9 \cdot 10^{-5}$ м. Распределения нормальных компонент напряжений σ_{xx} и σ_{yy} (остальные компоненты пренебрежимо малы), а также напряжений по Мизесу на поверхности листа в направлении оси x представлены на рис. 2.

В моде s_0 волны Лэмба преобладает продольная компонента смещения u . Для ее выделения на цилиндрическом волновом фронте волны

Лэмба в листе удобно использовать цилиндрическую систему координат (r, φ) с центром, совпадающим с центром источника. Используемые системы координат должны заранее быть заданы в разделе Parameters дерева модели. Если пренебречь незначительным вкладом статического изгиба листа, то продольные смещения u_r в направлениях распространения волны для каждой точки листа можно рассчитать как

$$u_r = u \cos \varphi + v \sin \varphi, \quad (3)$$

где u и v – соответственно продольная и поперечная горизонтальная компоненты смещений относительно оси x декартовых координат, полученные каждой точкой; φ – соответствующая этой точке угловая координата. Визуализация продольной радиальной u_r и поперечной вертикальной w компонент смещений моды s_0 волны Лэмба представлены на рис. 3. Поперечные компоненты v_r пренебрежимо малы.

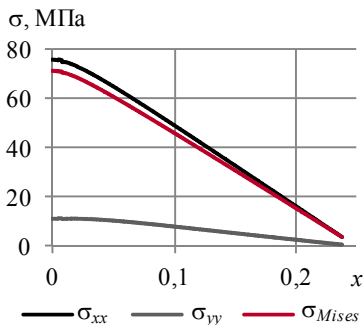


Рис. 2. Распределение механических напряжений σ в направлении оси x на «верхней» поверхности листа

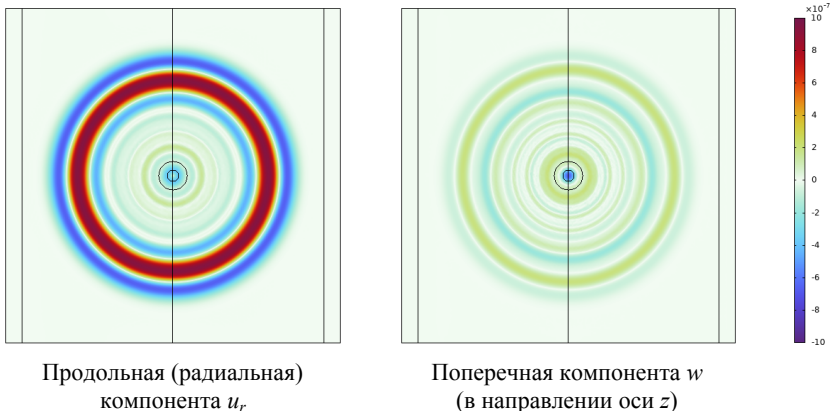


Рис. 3. Распределение смещений моды s_0 на поверхности листа в момент времени $t = 35$ мкс

К зависимостям смещений от времени, зарегистрированным в двух заданных точках, применен метод интерполяции сплайном. Для определения групповой скорости C_{s_0} волны Лэмба применены два метода: по моментам времени регистрации максимумов в импульсах и по пересечению переднего фронта импульса с уровнем 50 % от максимума. Результаты этих методов совпали до 0,01 м/с. В результате средняя скорость распространения моды s_0 на отрезке оси x от 75 до 175 мм (путь 100 мм) составила 5356,3 м/с для случая без нагружения. В нагруженном листе – 5356,7 м/с в системе координат (X, Y, Z) с отстройкой от удлинения листа и 5357,5 м/с в системе координат (x, y, z) без отстройки от удлинения листа. В направлении оси y (вдоль изгиба) скорости практически совпадают.

На отдельных участках рассматриваемого пути, как при нагружении, так и в свободном листе, зафиксировано более существенное неоднородное уменьшение скорости на 100 м/с по мере удаления от источника в сторону закрепленного края, что обусловлено сравнительно малыми размерами листа. Для повышения точности и достоверности при оценке скорости волн можно использовать модели объектов больших размеров (более 5λ в направлении распространения волны), использовать радиоимпульс или непрерывный режим, использовать мелкую сетку конечных элементов, увеличить порядок полиномов аппроксимации для конечных элементов, выполнить измерения и в других направлениях.

Выводы

Представлен подход, позволяющий моделировать в среде COMSOL Multiphysics акустоупругий эффект при распространении акустических волн в условиях статического нагружения, рассмотренный на примере моды s_0 волн Лэмба в нагруженной на изгиб стальной пластине толщиной 8 мм. Показано, что при среднем значении компоненты механического напряжения $\sigma_{xx} = 32$ МПа (или 30,5 МПа напряжения по Мизесу) скорость волн Лэмба в направлении линейного уменьшения напряжений увеличилась на 1,2 м/с с учетом удлинения листа. Выявлено, что требуется выработка дополнительных мер для повышения точности измерения скорости распространения волн Лэмба при моделировании.

Список использованных источников и литературы

1. *Викторов, И. А.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. – Москва : Наука, 1966. – 168 с.
2. *Cawley, P.* The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures / P. Cawley, D. Alleyne // Ultrasonics. – 1996. – No. 34. – Pp. 287–290. – DOI: 10.1016/0041-624X(96)00024-8.

3. 3D Analysis of interaction of Lamb waves with defects in loaded steel plates / R. Kažys, L. Mažeika, R. Barauskas, R. Raišutis, V. Cicėnas, A. Demčenko // *Ultrasonics*. – 2006. – No. 44. – Pp. e1127–e1130. – DOI: 10.1016/j.ultras.2006.05.152.

4. Исследование метода обнаружения и локализации неоднородностей в пластинах с использованием волн Лэмба / С. И. Муякшин, И. Н. Диденкулов, П. Н. Вьюгин [и др.] // *Акустический журнал*. – 2021. – Т. 67, № 3. – С. 270–274. – DOI: 10.31857/S0320791921030114. – EDN VWIXSE.

5. *Ильяшенко, А. В.* Теоретические аспекты применения волн Лэмба в неразрушающей диагностике слоистых анизотропных сред / А. В. Ильяшенко, С. В. Кузнецов // *Дефектоскопия*. – 2017. – № 4. – С. 3–21.

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.

7. *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 XHBVBB.

8. *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.

9. Оценка механического состояния композиционных материалов при циклических испытаниях акустическим методом на основе волн Лэмба / А. В. Еремин, С. В. Панин, А. В. Бяков, Р. Сундер // *Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций* : сб. материалов, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 244–245. – EDN YQQVFZ.

10. *Ярославкин, А. Ю.* Исследование дефектов технологических резервуаров с применением волн Лэмба / А. Ю. Ярославкин, А. А. Бакбардин, К. Ю. Комареус // *Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование* : сб. науч. тр. 5-й Междунар. молодежной науч.-практ. конф. (Курск, 14 нояб. 2018 г.). – Т. 2. – Курск : Университетская книга, 2018. – С. 391–394. – EDN YRUCHR.

11. *Ибадов, А. А.* Исследование зависимости фазовой скорости волн Лэмба от технического состояния трубопроводов ЖКХ / А. А. Ибадов, А. Е. Кондратьев, С. О. Гапоненко // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики* : материалы 92-го засед. Междунар. науч. семинара им. Ю. Н. Руденко. – Иркутск : Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отд. РАН, 2020. – С. 283–287.

12. *Гузь, А. Н.* Введение в акустоупругость / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуша. – Москва : Наук. думка, 1977. – 152 с.

S. A. Murashov ^{✉ a}, CSc in engineering, associate professor

L. V. Volkova, CSc in engineering, associate professor

M. A. Ageev, master student

A. A. Beznosov, student

E-mail: ^a sm-ii@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Peculiarities of Modeling the Propagation of Elastic Lamb Waves in a Plate under the Action of a Deforming Static Load in a COMSOL Multiphysics Environment

The article presents an approach to volumetric modeling by the finite element method in the COMSOL Multiphysics 6.1 medium of elastic wave propagation in plates under the action of a given static load leading to a complex stress-strain state of the plate, using the example of a single-period harmonic pulse of the fundamental symmetric mode s_0 of Lamb waves. The acoustoelastic properties of the material are given through the Murnaghan constant equations. The proposed approach makes it possible to simulate the propagation of elastic waves in large-diameter sheets or pipes in a stress-strain state and can be useful for research in the field of non-destructive testing, strain measurement, and structuroscopy.

Keywords: Lamb waves, propagation of elastic waves, finite element method (FEM), COMSOL Multiphysics, stress-strain state, acoustic guided wave testing.

УДК 681.586.73

*Х. М. Салихов*¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.
*Н. Д. Стоянов*², канд. физ.-мат. наук, ген. директор
*С. С. Молчанов*², канд. физ.-мат. наук, гл. инженер
Ю. Г. Малинин^{1, [✉](mailto:malinin_46@mail.ru) ^a}, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

*Б. Р. Буляков*¹, науч. сотр.

Д. И. Шарафетдинов^{1, [✉](mailto:DIsharafetdinov@mail.ru) ^b}, науч. сотр.

*Л. Р. Тагиров*¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.

*М. Х. Салахов*¹, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.

E-mail: ^amalinin_46@mail.ru, ^bDIsharafetdinov@mail.ru

¹Институт прикладных исследований Академии наук

Республики Татарстан, г. Казань

²ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», г. Санкт-Петербург

Разработка цифрового сенсора метана для применения в газомоторном автотранспорте

В условиях глобального потепления климата уменьшение выбросов углеродсодержащих газов в атмосферу вышло на передний план. Из ископаемых топлив наиболее низкоуглеродным и экологичным является метан – легковоспламеняющийся и взрывоопасный газ. Необходимо контролировать его утечки для предотвращения техногенных катастроф. В работе представлены результаты разработки компактного цифрового оптико-электронного сенсора метана для применения в газомоторном транспорте. Сенсор работает на принципе поглощения молекулами метана инфракрасного излучения при его прохождении через оптическую ячейку сенсора и обеспечивает предельную чувствительность сенсора 500 ppm метана в воздухе в лабораторных условиях.

Ключевые слова: низкоуглеродная энергетика, светодиоды среднего ИК-диапазона, оптическое поглощение, оптоэлектронный сенсор метана.

Введение

В последнее десятилетие в связи с проблемой глобального потепления внимание мирового сообщества обратилось к поиску и использованию низкоуглеродных источников энергии [1–7]. Из ископаемых топлив наиболее низкоуглеродным и экологичным является метан. Использование метана для получения различных видов энергии, в том числе и для движения транспорта, неуклонно расширяется. Поскольку метан – легковоспламеняющийся и взрывоопасный газ, необходимо контроли-

ровать его утечки для предотвращения техногенных катастроф. Хотя сенсоры метана давно производятся для обеспечения безопасности угледобывающих шахт, для применения в автомобильном транспорте они должны удовлетворять многим требованиям: компактность, низкое энергопотребление, высокое быстродействие, пожаробезопасность, работоспособность в широком диапазоне температур, низкая стоимость оснащения автомобиля, обслуживания и ремонта и др. В настоящее время сенсоров метана, использующих полупроводниковые диоды в качестве источника и детектора среднего инфракрасного (ИК) диапазона, на рынке нет.

Мы представляем компактный оптико-электронный сенсор метана для применения в газомоторном автотранспорте. Датчиком метана является оптическая ячейка для измерения поглощения ИК среднего диапазона длин волн в газе. Оптопара из светодиода и спектрально согласованных с ним фотодиодов плюс интегральный цифровой контроллер позволяют получить итоговую чувствительность сенсора 500 ppm метана в лабораторных условиях.

Методы и материалы

Газообразный метан поглощает свет в диапазоне среднего ИК-излучения в полосе длины волн 3,25–3,4 мкм (рис. 1). В качестве источника электромагнитного излучения с такой длиной волны в подавляющем большинстве случаев используются тепловые источники в комбинации с узкополосными светофильтрами. Они энергозатратны, инерционны, нагреваются до высоких температур и дорого стоят (в основном из-за светофильтров).

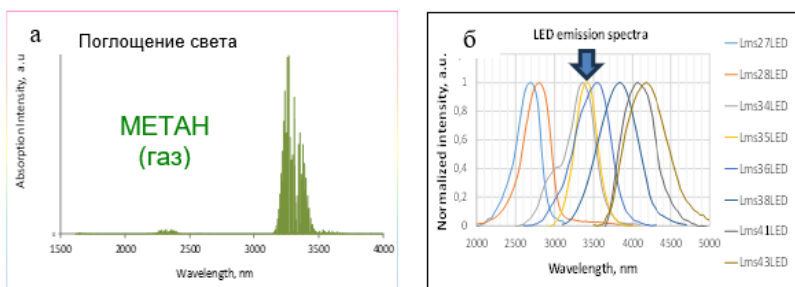


Рис. 1. Полоса поглощения среднего ИК-излучения газообразным метаном (а); полосы излучения линейки светодиодов ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» (б). Стрелкой отмечен светодиод, центр полосы излучения которого практически совпадает с центром полосы поглощения газообразного метана

Компания ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» обладает уникальной в мире технологией выращивания полупроводниковых гетероструктур на базе твердых растворов в системе InAs-GaSb-InP [8] и известна на мировом рынке производством на их основе светодиодов и фотодиодов с длиной волны максимума инфракрасного (ИК) излучения в диапазоне 1,0–5,0 мкм, в котором находятся полосы поглощения углеводородов и промышленных газовых выбросов. Более 150 компаний, в том числе лидеры мирового рынка в основном из недружественных стран, закупили образцы для разработки своих сенсоров различного назначения.

Мы предлагаем использовать полупроводниковые светодиоды в качестве источника излучения в датчике метана вместо существующих на рынке тепловых источников. Так как можно подобрать светодиоды с полосой излучения весьма близкой по ширине и форме к полосе поглощения газообразного метана, отпадает необходимость в дорогостоящих светофильтрах, да и сами светодиоды дешевле тепловых источников. Таблица дает представление о преимуществах светодиодных источников среднего ИК-диапазона над тепловыми.

Сравнение светодиодных источников ИК-диапазона и тепловых источников

Параметр	Светодиодный чип	Тепловой источник
Размер источника, мм	Миниатюрный – размер чипа 0,4×0,4	> 2×2
Энергопотребление	Очень низкое, ~1 мВт в импульсном режиме	Более 100 мВт. На два порядка больше!
Быстродействие	Очень короткое – порядка 10 нс	Низкая скорость модуляции – миллисекунды
Нагрев при работе	Практически нет нагрева	Рабочая температура более 200 °С, часто до 400 °С
Ширина спектра	Сравнима с шириной спектра полос поглощения химических веществ	Очень широкий спектр (спектр черного тела), нужны фильтры
Стоимость	Резкое снижение себестоимости при больших объемах производства	2–10 Euro

Основой компактного сенсора метана является оптическая ячейка, состоящая из оптопары, то есть светодиода и спектрально согласованных с ним двух фотодиодов: опорного и измерительного (рис. 2).



Рис. 2. Верхняя строка – принципиальная схема оптической ячейки.
Нижняя строка – реализация оптической ячейки (длина ячейки – 40 мм)

Практическая реализация прототипа опико-электронного сенсора метана представлена на рис. 3.

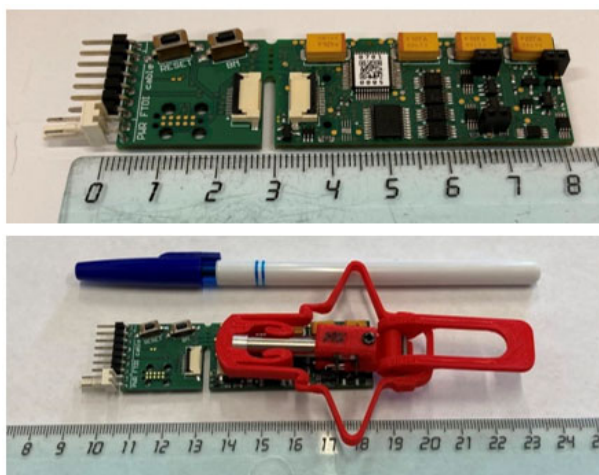


Рис. 3. Интегральный цифровой контроллер сенсора метана – верхнее фото.
Сенсор метана в сборе с оптической ячейкой – нижнее фото (красная пластиковая деталь – технологический быстросъемник оптической ячейки)

Цифровой контроллер сенсора метана выполнен на интегральной элементной базе высокой плотности и включает в себя блок импульсно-го питания светодиода, блок синхронного детектирования и усиления сигналов опорного и измерительного фотодиодов, аналого-цифровой преобразователь, блок цифровой фильтрации и обработки сигналов, преобразователь в цифровой формат CAN/256 (Controller Area Network) для встраивания в цифровую среду управления системами современного автотранспорта (тягач, автобус, легковой автомобиль). Прототип сенсора метана в составе оптической ячейки и цифрового контроллера позволяет обеспечивать итоговую чувствительность сенсора ≥ 500 ppm метана в воздухе в лабораторных условиях (рис. 4).

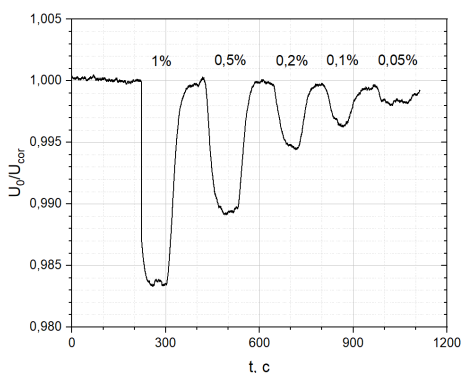


Рис. 4. Отклик прототипа сенсора метана на подачу в испытательную ячейку импульсов калиброванных смесей метана в азоте. Концентрация метана в подаваемой смеси указана в объемных процентах над кривой записи выходного сигнала, условия измерений – комнатная температура в климатической камере лаборатории

Выводы

Использование в разработке оптико-электронного сенсора метана современных твердотельных узкополосных источников ИК-излучения среднего диапазона длин волн позволяет изготовить прототип сенсора метана, обладающий такими преимуществами, как компактность, ультранизкое энергопотребление (несколько мВт), высокое быстродействие, пожаробезопасность, работоспособность в широком диапазоне температур и влажности воздуха в течение длительного времени (до 5 лет). Цифровой интерфейс позволяет легко интегрировать подобный сенсор в цифровую среду управления системами современного автомобиля.

Список использованных источников и литературы

1. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года // Правительство России. – URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).
2. Доброславский, Н. Декарбонизация в условиях неопределенности: пути и решения / Н. Доброславский, Д. Сесицкий // SKOLKOVO Московская школа управления. – 2022. – 117 с.
3. Лебедева, М. А. Проблемы декарбонизации экономики России // Проблемы развития территорий. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 57–72.
4. Механизмы реализации концепции низкоуглеродного развития экономики / И. С. Белик, Н. В. Стародубец, Т. В. Майорова, А. И. Ячменева. – Уфа : Омега Сайнс, 2016. – 119 с.
5. A framework to decarbonize the economy // OECD ECONOMIC POLICY PAPER. – February 2022. – No. 31. – 89 p.
6. Natural gas // Trading economics. – URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/natural-gas> (дата обращения: 10.10.2024).
7. Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector // International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (дата обращения: 10.10.2024).
8. LED Microsensor NT. – URL: <https://ru.lmsnt.com/> (дата обращения: 10.10.2024).

*H. M. Salihov*¹, DSc in phys. and math., chief researcher
*N. D. Stoyanov*², CSc in phys. and math., general manager
*S. S. Molchanov*², CSc in phys. and math., chief engineer
Yu. G. Malinin^{1, ✉^a}, CSc in phys. and math., senior researcher
*B. R. Bulyakov*¹, researcher
D. I. Sharafetdinov^{1, ✉^b}, researcher

*L. R. Tagirov*¹, DSc in phys. and math., chief researcher
*M. H. Salahov*¹, DSc in phys. and math., chief researcher
E-mail: ^a malinin_46@mail.ru, ^b DSharafetdinov@mail.ru

¹ Institute of Applied Research of the Academy of Sciences
of the Republic of Tatarstan, Kazan

² LED Microsensor NT LLC, St. Petersburg

Development of a Digital Methane Sensor for Use in Gas-Powered Vehicles

In the context of global climate warming, reducing emissions of carbon-containing gases into the atmosphere has come to the fore. Of the fossil fuels, methane, a highly flammable and explosive gas, is the most low-carbon and environmentally friendly. It is necessary to control its leaks to prevent man-made disasters. The paper presents the

results of the development of a compact digital optoelectronic methane sensor for use in gas-powered transport. The sensor works on the principle of absorption of infrared radiation by methane molecules as it passes through the optical cell of the sensor and provides the maximum sensitivity of the sensor 500 ppm of methane in the air in laboratory conditions.

Keywords: low-carbon energy, mid-IR LEDs, optical absorption, optoelectronic methane sensor.

УДК 620.179.16

М. А. Синцов [✉], ведущий инженер

А. С. Хомутов, аспирант

П. Н. Пушин, аспирант

К. А. Торхов, аспирант

А. О. Лукиных, магистрант

E-mail: omtc11@mail.ru

Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова г. Ижевск

Оценка параметров рэлеевских волн в технологическом цикле производства цилиндров глубинных штанговых насосов

В данной работе представлены результаты изменения скорости рэлеевских волн в зависимости от режимов термообработки на различных стадиях технологического процесса производства цилиндров глубинных штанговых насосов.

Ключевые слова: цилиндры, временной теневой метод, скорость рэлеевских волн.

Введение

Цилиндры глубинных штанговых насосов являются ответственными элементами в нефтедобывающей отрасли. Для неразрушающего контроля цилиндрических объектов традиционно используют визуально-оптический и ультразвуковой метод, достоверность результатов которого зависит от качества обработки поверхности и качества контакта [3, 4].

Целью работы является поиск закономерностей информативных параметров рэлеевской волны на разных этапах технологического процесса изготовления цилиндров глубинных штанговых насосов.

Материалы и методы

Для определения, выбора и оценки информативных параметров выбран временной теневой метод многократных проходов, реализованный при помощи электромагнитно-акустического преобразователя с применением рэлеевских волн. Преимуществом данного метода является скорость проведения контроля, так как требуется сканирование только по образующей объекта контроля (ОК) [1]. Для считывания ин-

формативных параметров рэлеевских волн (времени распространения и затухания) использован структуроскоп СЭМА и программное обеспечение «ПРИНЦ» [2]. Схема реализации показана на рис. 1.

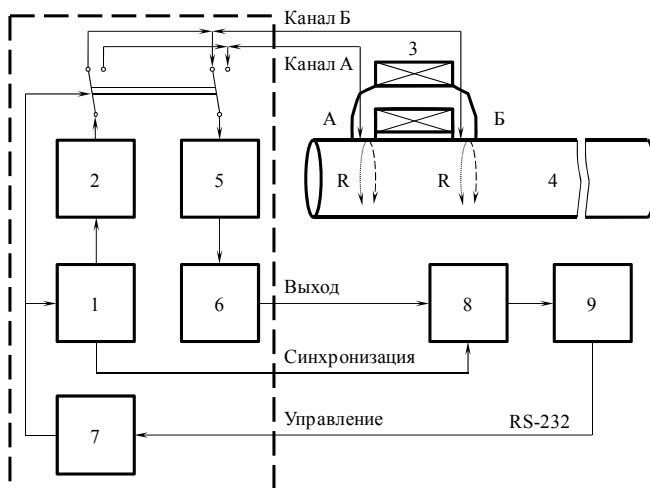


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки с ЭМА-преобразователем рэлеевских волн: 1 – генератор синхрои́мпульсов, 2 – генератор зондирующих импульсов, 3 – накладной двухканальный ЭМА-преобразователь с роботизированной подвижной платформой, 4 – исследуемый образец заготовки, 5 – полосовой фильтр, 6 – высокочастотный усилитель, 7 – плата управления генератором синхрои́мпульсов и каналами, 8 – аналого-цифровой преобразователь, 9 – персональный компьютер с программным обеспечением «ПРИНЦ»

Для анализа информативных параметров исследована партия из 32 труб-заготовок из стали 38CrMoAl длиной 4450 мм и наружным диаметром 57,64 мм. В качестве анализируемых первичных информативных параметров выбраны: скорость рэлеевской волны, амплитуда, затухание, дисперсия, матожидание. Измерения информативных параметров производились после каждого этапа производства цилиндров, а именно: в состоянии поставки, после термообработки (отжига) и после азотирования внутритрубного поверхностного слоя.

Результаты

По результатам обработки полученного массива данных выявленная связь скорости рэлеевских волн с операцией термической обработки представлена на рис. 2.

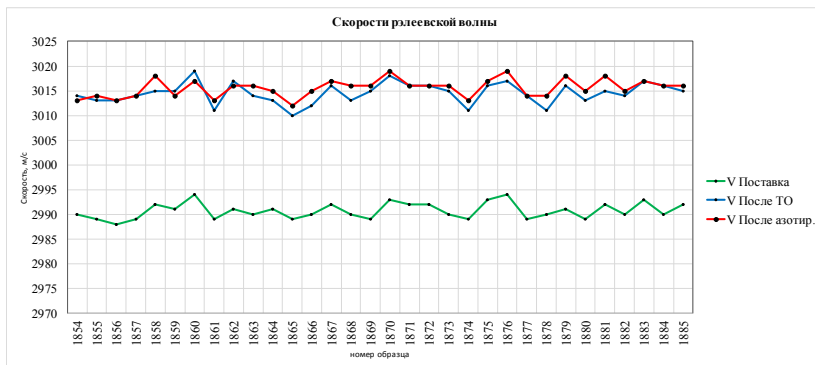


Рис. 2. График зависимости скоростей рэлеевских волн от режимов термообработки

Как видно из графика (рис. 2), скорость рэлеевской волны на трубах-заготовках составляет 2990 ± 1 м/с и растет на 25 м/с после термообработки до 3015 ± 1 м/с. При этом последующее азотирование не влияет на изменение скоростей, так как этой операции подвергается внутренняя поверхность трубы, а рэлеевские волны распространяются по наружной цилиндрической поверхности.

Выводы

Проведены эксперименты по определению наличия зависимости скорости рэлеевской волны от различных режимов термической обработки на разных стадиях производства цилиндров глубинных штанговых насосов. Скорость рэлеевской волны растет на 25 м/с после отпуска и достигает 3015 м/с. Полученные данные могут быть применены для контроля режимов термообработки цилиндров глубинных штанговых насосов в процессе производства.

Список использованных источников и литературы

1. Муравьев, В. В. Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн / В. В. Муравьев, А. Ю. Бурин, М. А. Синцов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 2. – С. 37–43.
2. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1 (17). – С. 243–250.

3. *Kim, C.* Evaluating rolling contact fatigue damage precursors with Rayleigh waves in 1060 steel // *J. Nondestruct. Eval.* – 2021. – Vol. 40, no. 4. – P. 91.
4. A new method for plastic strain measurement with Rayleigh wave polarization / *C. Pei, S. Zhao, T. Liu, Zh. Chen* // *Ultrasonics.* – 2018. – Vol. 188. – Pp. 168-173.

M. A. Sintsov [✉], lead engineer

A. S. Homutov, postgraduate student

P.N. Pushin, postgraduate student

K.A. Torhov, postgraduate student

A. O. Lukinykh, master student

E-mail: omtc11@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk


Estimation of Rayleigh Wave Parameters in the Technological Cycle of Poduction of Cylinders of Deep Rod Pumps

This paper presents the results of changes in the velocity of Rayleigh waves depending on the modes of heat treatment at various stages of the technological process of production of cylinders of deep rod pumps.

Keywords: cylinders, time shadow method, Rayleigh wave speed.

УДК 620.179.16

В. А. Стрижак, канд. техн. наук, доц.

Д. И. Ашихмин , студент

E-mail: 2407daniil@mail.ru

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

Оценка временных затрат программного обеспечения при прозвучивании прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях

Рассмотрено влияние параметров программного обеспечения на скорость сканирования при контроле прутков зеркально-теневым методом. Определены факторы и параметры для оптимизации временных затрат измерительной системы.

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

Введение

В современном мире широкое распространение получил неразрушающий контроль с использованием элетромагнитно-акустических преобразователей [1–6]. В частности, для контроля прутков разрабатывается зеркально-теневой метод контроля на многократных отражениях с использованием ЭМА-датчика. Акустический импульс возбуждается на поверхности тела прутка и распространяется вглубь, а впоследствии многократно отражается от его противоположной поверхности. В процессе измерения фиксируются импульсы, многократно прошедшие по поперечному сечению объекта контроля [7–10].

На форму огибающей серии импульсов влияет множество факторов, таких как плотность материала объекта контроля, его однородность, наличие различных включений и т. д. Объем регистрируемых данных G [байт] определяется частотой дискретизации аналого-цифрового преобразователя f_d , разрешением аналого-цифрового преобразователя в байтах m и длиной временной оси t_r . Длина временной оси t_r – длительность сигнала, регистрируемого компьютером при однократном измерении (длина эхограммы).

$$G = f_d \cdot m \cdot t_r \cdot 1000. \quad (1)$$

На основе полученных данных программа «ПРИНЦ IX Fast» строит эхограмму импульсов или производит расчет информативных параметров. На рис. 1 представлена эхограмма, полученная на прутке диаметром 10 мм. Длина временной оси составляет XX мс. На эхограмме присутствует зондирующий импульс (в ограничении) и набор эхо-импульсов. Часть донных импульсов в начале эхограммы находится в зоне с помехами от зондирующего импульса. Перед началом измерения пользователь задает границы регистрируемой эхограммы, на основании которой рассчитываются целевые параметры.

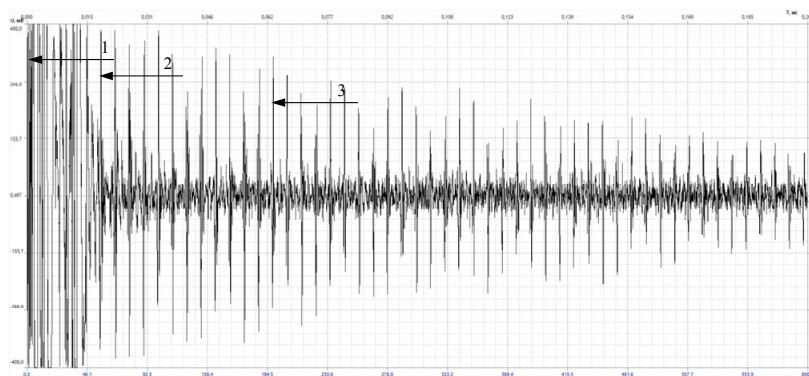


Рис. 1. Зарегистрированный сигнал в виде эхограммы, усреднение 32, без фильтрации: 1 – зондирующий импульс; 2 – 6-й донный импульс; 3 – 18-й донный импульс

Описание эксперимента

Особенности работы ЭМА-датчика предполагают необходимость многократного усреднения сигнала, позволяющего улучшить соотношение полезного сигнала к уровню шума. Задачей является выбор временных параметров регистрации с учетом усреднения и оценка объема дополнительных затрат на математическую обработку, что позволит определить оптимальную скорость сканирования при контроле протяженного прутка [11, 12].

В эксперименте использовался системный блок в конфигурации: Intel Core i5 3470 3.2 GHz / ASUS P8B75-M / 8 Гб DDR3 / HDD 2 Тб / АЦП ЛА-н10м8РСІ-100 / Win10. Регистрация эхограммы возможна при частотах дискретизации АЦП 50 МГц или 100 МГц. Время, затраченное компьютером на получение результирующей эхограммы, учитывает

время многократной регистрации эхограммы, затраты на пересылку полученных данных с последующей их консолидацией, но не учитывает параметр синхронизации, так как он нуждается в отдельном рассмотрении. Результаты работы системы регистрации, полученные при длине временной оси 0,1 мс, 0,2 мс и 0,4 мс и усреднении $n = 32$, представлены в таблице. При получении результатов за фрагмент эхограммы принята вся эхограмма.

Время регистрации кадра в зависимости от частоты дискретизации и длины временной оси при усреднении $n = 32$

Длина временной оси t_r , мс	0,1		0,2		0,4	
Частота дискретизации f_d , МГц	50	100	50	100	50	100
Число точек на временной оси G , тыс.	5	10	10	20	20	40
Объём кадра данных G , Кб	160	320	320	640	640	1280
Время измерения t_k , мс	20,2	30,7	39,6	62,5	72,7	117,2
Время получения 1 эхограммы, мс	0,6	1,0	1,2	2,0	2,3	3,7

Временные интервалы фиксировались с использованием внутреннего интерфейса прибора, представленного на рис. 2.

Параметр	Значение	Нижний предел	Верхний предел	
<input checked="" type="checkbox"/> Кадр (мс)	31,0975	0,0000	0,0000	Выше
<input checked="" type="checkbox"/> Измерение (мс)	29,5569	0,0000	0,0000	Выше
<input checked="" type="checkbox"/> Минимум	-0,0981	0,0000	0,0000	Выше
<input checked="" type="checkbox"/> Максимум	0,0748	0,0000	0,0000	Выше
<input checked="" type="checkbox"/> Матожидание	-2,9512	0,0000	0,0000	Выше
<input checked="" type="checkbox"/> Дисперсия	585,2792	0,0000	0,0000	Выше

Рис. 2. Интерфейс отображения временных характеристик ПО «ПРИНЦ X Fast»

Параметр «кадр» – время, затраченное компьютером на выполнение текущей задачи в комплексе. Параметр «измерение» – время, затраченное компьютером на выполнение задачи в рамках регистрации данных и расчета целевых параметров, без учета времени накладных расходов, вызванных работой компьютерной системы. Отображение информации на экране компьютера и расчет статистических характеристик производится в отдельном потоке и при проведении эксперимента не учитывается. В соответствии с таблицей время в основном определяется объемом использованных данных и его можно ориентировочно рассчитать по формуле:

$$t_k = (t_r + G \cdot V_G) \cdot n, \quad (2)$$

где t_k – время получения результирующей эхограммы после усреднения; t_r – длина временной оси; G – объем регистрируемых данных; V_G – коэффициент скорости пересылки и утилизации данных с учетом конфигурации компьютера. В предложенной конфигурации компьютера коэффициент V_G составил 11 мб/с.

Результаты и их обсуждение

Результатом измерения является набор расчетных значений, полученных при математической обработке фрагмента эхограммы. Обработка сигнала включает: фильтрацию, выпрямление, потенцирование, отсечение шума, нормирование, построение огибающей, расчет целевых параметров. Базовую часть времени составляют непосредственные измерения, пересылка их результатов и усреднение, представленные в графиках («без фильтров») на рис. 3.

Фильтрация вносит основной вклад в суммарное время, затрачиваемое компьютером на обработку эхограммы. Зависимость времени измерения от величины усреднения при различной ширине окна фильтра показано на рис. 3. Результаты получены без синхронизации регистрирующей системы с зондирующим импульсом. Длина временной оси 0,2 мс.

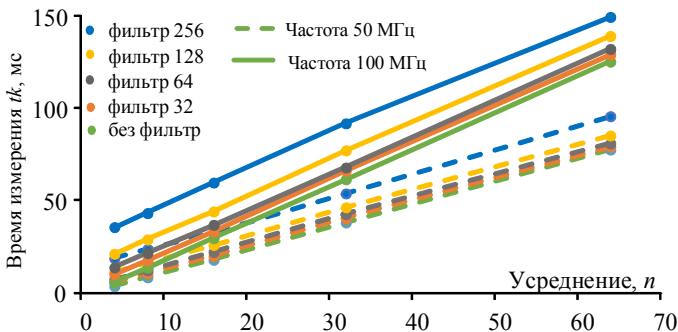


Рис. 3. Зависимость времени кадра от усреднения и фильтрации

Увеличение усреднения приводит к линейному росту времени регистрации. Фильтрация результирующих данных производится после усреднения эхограмм методом скользящего окна. Затраты времени на фильтрацию зависят от количества зарегистрированных точек и длины

окна фильтра. Оценить потери времени на фильтрацию можно по формуле

$$t_{\phi} = 5,85 \cdot L_{\phi} \cdot G / 1000, \quad (3)$$

где t_{ϕ} – время на фильтрацию, мс; L_{ϕ} – длина окна фильтра, точек; G – число точек на временной оси G , тыс.

При проведении измерений обязательным является синхронизация начала процесса регистрации эхограммы с зондирующим импульсом. Избыточно высокая частота следования зондирующих импульсов приводит к наличию акустического шума от незатухших импульсов предыдущего измерения. Слишком низкая частота следования зондирующих импульсов вызывает избыточное ожидание импульса синхронизации, что с учетом необходимости усреднения эхограмм существенно снижает скорость получения результирующих данных и в результате приводит к низкой скорости сканирования. В приборе предусмотрена возможность задания частоты следования зондирующего импульсов в диапазоне от 1 до 10 мс с шагом 1 мс. Таким образом, если частота следования зондирующих импульсов задана в 500 Гц (интервал 2 мс), то при усреднении $n = 32$ и затратах времени на обработку полученных сигналов длительностью эхограммы 10 мс частота получения результирующих данных может составить 13,5 Гц. При этом во время обработки данных синхроимпульсы будут пропущены. При ширине зоны контроля в 10 мм скорость сканирования составит 8,1 м/мин.

Вывод

Программная среда информационно-измерительного комплекса, реализующего зеркально-теневого метод контроля на многократных отражениях с использованием ЭМА-датчика, существенно влияет на скорость получения измерительной информации. Основные факторы, определяющие временные затраты: количество точек на временной оси, коэффициент усреднения, частота дискретизации и размер окна фильтра.

Список использованных источников и литературы

1. 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.
2. Влияние термической обработки и структурного состояния стали 40Х пруткового сортамента на скорость ультразвуковых волн и коэффициент Пуассона / В. В. Муравьев, А. Ф. Башарова [и др.] // Сталь. – 2020. – № 8. – С. 63–68. – EDN MKTWDN.

3. 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.

4. *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 NHHHPU.

5. *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.

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. *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 OYSXOJ.

8. *Муравьева, О. В.* К вопросу о повышении эффективности проходного электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн / О. В. Муравьева, Ю. В. Мышкин, А. А. Наговицын // Дефектоскопия. – 2023. – № 3. – С. 3–13. – DOI: 10.31857/S0130308223030016. – EDN OOQZWK.


9. *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.

10. *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.

11. 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.

12. *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.

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

D. I. Ashihmin , student

E-mail: 2407daniil@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Estimation of the Time Spent by the Software when Sounding Bars Using the Mirror-Shadow Method on Multiple Reflections

The influence of software parameters on the scanning speed during the control of bars by the mirror-shadow method is considered. The factors and parameters for optimizing the time costs of the measuring system are determined.

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

УДК 620.179.16

В. А. Стрижак ^{✉ a}, канд. техн. наук, доц.

А. В. Пряхин, ведущий инженер

Р. Р. Хасанов ^{✉ b}, ведущий инженер

П. Н. Пушин, аспирант

К. А. Торхов, аспирант

E-mail: ^a str@istu.ru, ^b beif@mail.ru

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

Особенности волноводного акустического контроля в технологическом цикле производства цилиндров и плунжеров глубинных штанговых насосов

Произведено опробование волноводной методики для входного контроля труб заготовок для глубинных скважинных насосов. Методика не требует сканирования и чувствительна к дефектам вне зависимости от глубины их залегания. Искусственный отражатель в виде магнита позволяет проводить настройку дефектоскопа по уровню чувствительности. Для труб диаметром 59 мм и с толщиной стенки 14 мм эхо-сигнал от искусственного отражателя при его перемещении с внешней стороны трубы на внутреннюю сторону уменьшается на 2 дБ.

Ключевые слова: крутильные волны, трубы, акустический контроль.

Введение

Традиционно при контроле трубного металлопроката используют магнитоиндукционный и вихретоковый методы контроля, имеющие общий недостаток – необходимость сканирования тела проката, что требует соответствующего механизированного оборудования и снижает производительность установок [1, 2]. Несмотря на преимущество бесконтактной работы, указанные методы выявляют лишь поверхностные и приповерхностные дефекты. Основная проблема при их использовании – сложность идентификации дефектов ввиду отсутствия однозначной связи между механическими свойствами объекта контроля и изме-

© Стрижак В. А., Пряхин А. В., Хасанов Р. Р., Пушин П. Н., Торхов К. А., 2024

Исследование выполнено в рамках проекта № ИНМ/75/2022 от 28.03.2023 г. по заказу АО «ИжНефтеМаш» с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

ряемыми магнитными и электрическими величинами. К существенным недостаткам относятся также чувствительность к изменениям зазора, магнитным свойствам объекта контроля, необходимость натяжения проката при контроле, остаточная намагниченность. Предлагаемые методы контроля, реализующие прозвучивание трубы с использованием разнообразных ультразвуковых методик, также требуют сканирования [3–5]. Волноводная методика контроля позволяет проводить контроль труб без сканирования при установке датчика на торец трубы [6, 7].

Методы и материалы

При производстве глубинных скважинных насосов используются трубы бесшовные ТУ 14-159-296–2004. Трубы изготавливаются из расточенных и обточенных холоднодеформированных труб-заготовок. ТУ 14-159-1128–2008 нормирует предельные отклонения по наружному диаметру $\pm 0,15$ мм и толщине стенки при повышенной точности изготовления $+12,5\%$ / $-10,0\%$. Все трубы подвергаются неразрушающему контролю ультразвуковым, магнитоиндукционным или вихретоковым методом. Ультразвуковой метод ориентирован на поиск продольных дефектов, и для настройки чувствительности используется искусственный отражатель в виде риски глубиной 10 % от номинальной толщины стенки, но не более 2 мм при ее ширине 1,5 мм. Для настройки магнитоиндукционного и вихретокового метода используется сквозное отверстие диаметром $2,7 \pm 0,27$ мм или для труб с толщиной стенки не более 12,5 мм – риска, аналогичная ультразвуковому методу контроля. На поверхности труб не должно быть плен, трещин, рванин, раковин, закатов, расслоений, при этом допускаются забоины, вмятины, риски, рябизна и следы зачистки дефектов, не выходящих за минусовые допуски на толщину стенки.

Описание эксперимента

В отличие от рекомендуемых в ТУ методов контроля, волноводная методика обеспечивает быстрый универсальный способ прозвучивания тела трубы одновременно по всему ее сечению [7–10]. Опробование волноводной методики произведено на пяти образцах труб диаметром 47,5–59,3 мм с толщинами стенки 5,5–14 мм. Прозвучивание проведено с использованием дефектоскопа АДНШ-П (тип средства измерения – № 82936-21) эхоимпульсным методом с использованием крутильных волн совместно с методом многократных отражений [11, 12].

Результаты и их обсуждение

Результаты прозвучивания труб представлены в табл. 1. Параметр R_1 и R_N – уровни акустических шумов на 1-м и $N = 10$ отражении, приведенные к величине 1-го донного импульса. Используемая методика не обнаружила явных дефектов в представленных образцах труб. Результаты прозвучивания со стороны трубы А и Б в таблице представлены разными записями. Частота f рассчитана как величина, обратная времени t между двумя положительными полупериодами в 1-м донном импульсе $f = 1/t$. Расчет скорости произведен на участке между 1-м и 2-м донным импульсом методом поиска степени похожести сигналов через функцию корреляции [13, 14]. Затухание β рассчитывалось как среднее значение коэффициентов затухания β_N , полученных для интервалов между первым и N отражением, где $N = 2 \dots 8$:

$$A_N = A_1 \cdot e^{-\beta_N \frac{2LN}{C_t}}, \quad (1)$$

где A_N – значение амплитуды N донного импульса; A_1 – значение амплитуды первого донного импульса; L – длина объекта; N – номер отражения донного импульса; C_t – скорость крутильной волны.

Коэффициент затухания β рассчитан по формуле

$$\beta_N = -\ln \frac{A_N}{A_1}. \quad (2)$$

Таблица 1. Акустические свойства труб, крутильная волна

Номер образца	№1	№2	№3	№4	№5
	А/Б	А/Б	А/Б	А/Б	А/Б
Диаметр d , мм	47,5	54,2	59,3	57,8	57,8
Резьба	нет	нет	нет	да	да
Длина L , мм	3310	3501	3500	4275	3352
Толщина стенки h , мм	6,2	5,5	14	6,68	6,68
Уровень акустических шумов на 1-м отражении R_1 , дБ	-38,0 /	-40,1 /	-40,8 /	-38,6 /	-39,6 /
	-39,3	-43,7	-40,4	-47,3	-42,8
Уровень акустических шумов на 8-м отражении R_N , дБ	34,2 /	-31,9 /	-33,7 /	-40,9 /	-31,8 /
	36,7	-31,1	-34,5	-44,2	-32,0
Затухание β , 1/км	15,5 /	16,8 /	8,2 /	16,3 /	22,9 /
	18,5	16,7	7,9	20,8	26,5
Скорость C_T , м/с	3268 /	3330 /	3290 /	3279 /	3257 /
	3267	3330	3290	3279	3256
Частота f , кГц	21,4 /	22,2 /	20,2 /	24,9 /	22,1 /
	23,8	26,3	19,8	24,9	25,5

Для оценки предварительной чувствительности метода к дефектам разработан и изготовлен искусственный отражатель, содержащий магнит, устанавливаемый на поверхности трубы по ее образующей. Искусственный отражатель представляет собой магнит толщиной 5 мм и длиной 40 мм, закрепленный на пластиковой штанге длиной 1,66 м. Магнит устанавливается вдоль оси трубы, в зоне механического контакта магнита и трубы за счет силы притяжения создает эффект присоединенной массы (имитация дефекта – наплыв материала) [15].

Так как чувствительность метода контроля с использованием крутильных волн зависит от положения дефекта по радиусу трубы и падает с его уменьшением, в качестве экспериментальной трубы выбран образец № 3 с наибольшей среди представленных труб толщиной стенки $h = 14$ мм. Искусственный отражатель последовательно устанавливался с внешней и с внутренней стороны трубы. По регистрируемой эхограмме оценивается эхосигнал от искусственного отражателя в процентах от величины эхосигнала 1-го донного импульса. Вид эхограммы в звене «0» дефектоскопа АДНШ-П на трубе с установленным искусственным отражателем представлен на рис. 1, а.

Хотя поиск искусственного отражателя на 1-м отражении невозможен, его отклик наблюдается на эхограмме в старших отражениях. Вид эхограммы на 8-м отражении представлен на рис. 1, б. В силу особенностей прохождения акустического импульса по телу трубы на многократных отражениях сигнал от искусственного отражателя дублируется в правой и левой части анализируемого участка.

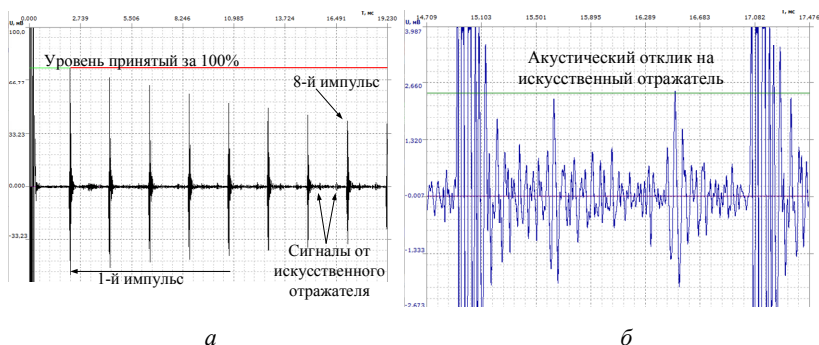


Рис. 1. Эхограмма трубы с искусственным отражателем (а) и эхограмма трубы в искусственном отражателе на 8-м отражении (б)

В табл. 2 приведены значения амплитуды эхосигналов от искусственного отражателя, установленного на внешней и внутренней стороне

трубы. Значения сигналов приведены к амплитуде 1-го донного импульса. Чувствительность метода к дефектам на внутренней поверхности трубы по сравнению с внешней падает на 2 дБ. При этом величина эхосигнала от искусственного отражателя превышает уровень шумов на 8 дБ для внешней поверхности и на 6 дБ для внутренней поверхности трубы. Для труб с меньшей толщиной стенки разница по чувствительности к дефектам на внутренней поверхности трубы и на внешней поверхности трубы будет значительно меньше.

Таблица 2. Величина акустического отклика на искусственный отражатель, расположенный на трубе диаметром 59,3 мм и с толщиной стенки 14 мм

	Расположение искусственного отражателя	
	Внешняя сторона	Внутренняя сторона
Эхосигнал от дефекта, % (дБ)	3,28 (50,3)	2,62 (48,4)
Уровень шума, % (дБ)	1,36 (42,7)	1,36 (42,7)

Выводы

Волноводная методика, в силу отсутствия необходимости сканирования и чувствительности к дефектам, вне зависимости от глубины их залегания подойдет для входного контроля труб заготовок для глубинных скважинных насосов. Искусственный отражатель в виде магнита позволяет проводить настройку дефектоскопа по уровню чувствительности. Для труб диаметром 59 мм и с толщиной стенки 14 мм эхосигнал от искусственного отражателя, при его перемещении с внешней стороны трубы на внутреннюю сторону, уменьшается на 2 дБ.

Список использованных источников и литературы

1. Марков, А. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов / А. А. Марков, Е. А. Максимова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 22–32. – DOI: 10.22213/2413-1172-2019-2-22-32. – EDN HNQVES.
2. Неразрушающий контроль : справ. в 7 т. / В. В. Клюев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин, В. Н. Филинов, А. А. Кеткович, М. В. Филинов, В. И. Матвеев. Т. 6. – Москва : Машиностроение, 2004. – 832 с. – ISBN 5-217-03238-3. – EDN QMDRSD.
3. Бесконтактный спектральный экспресс-способ обнаружения коррозионных повреждений металлоизделий / Г. М. Сучков, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, С. Ю. Плеснецов, З. В. Билык, Ю. Е. Хорошайл, С. А. Ефименко, Б. Салам // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 14–21. – DOI: 10.31857/S0130308220010029. – EDN HJAHZS.
4. Муравьева, О. В. Сравнительная чувствительность информативных параметров электромагнитно-акустического зеркально-теневого метода на много-

кратных 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.

5. 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.

6. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124. – DOI: 10.7868/S032079191506009X. – EDN UWFWFB.

7. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения РАН, 2017. – 234 с. – ISBN 978-5-7692-1560-5. – EDN YUNZJR.

8. *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 **NDKCS**D.

9. 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**.

10. *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.

11. 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.

12. *Стрижак, В. А.* Стенд для определения зависимости скорости стержневой волны от температуры в металлических прутках // Контроль. Диагностика. – 2023. – Т. 26, № 3 (297). – С. 40–49. – DOI: 10.14489/td.2023.03.pp.040-049. – EDN WMUCGO.

13. *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.

14. *Муравьев, В. В.* 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.

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

V. A. Strizhak ^{✉ a}, CSc in engineering, associate professor

A. V. Pryakhin, leading engineer

R. R. Khasanov ^{✉ b}, leading engineer

P. N. Pushin, postgraduate student

K. A. Torkhov, postgraduate student

E-mail: ^a str@istu.ru, ^b beif@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Features of Waveguide Acoustic Testing in the Technological Cycle of Production of Cylinders and Plungers for Deep-Well Sucker Rod Pumps

The waveguide technique was tested for incoming inspection of pipe blanks for deep well pumps. The technique does not require scanning and is sensitive to defects regardless of their depth. An artificial reflector in the form of a magnet allows you to adjust the flaw detector according to its sensitivity level. For pipes with a diameter of 59 mm and a wall thickness of 14 mm, the echo signal from an artificial reflector, when it moves from the outside of the pipe to the inside, decreases by 2 dB.

Keywords: torsional waves, pipes, acoustic control.

УДК 620.179.152.1

Линьюэ Цзи ^{✉ a}, аспирант

А. В. Батрагин ^{✉ b}, канд. техн. наук, доц.

E-mail: ^a lingyue@tpu.ru, ^b batranin@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск

Измерение площади поперечного сечения пористого материала методом рентгеновской томографии

Работа посвящена измерению площади поперечного сечения пористого материала методом рентгеновской томографии. Рентгеновская томография является перспективным неразрушающим методом контроля, позволяющим анализировать изображения для характеристики пористого материала. Данные были получены на рентгеновском томографе высокого разрешения Орел-МТ. Расчеты проводились в программе STaп, которая предназначена для количественного анализа томографических данных. Приведены данные для модельного образца пористого материала, представляющего собой набор стеклянных шариков, и для пористого интерметаллида с разной пористостью.

Ключевые слова: пористый материал, компьютерная томография, площадь, пористость, неразрушающий контроль.

Введение

В настоящее время рентгеновская томография широко применяется в разнообразных сферах научной и практической деятельности. Она успешно задействована как в области медицины, так и в промышленности для неразрушающего контроля [1, 2]. В отличие от традиционных экспериментальных методов рентгеновская томография позволяет неразрушающим способом получить трехмерное изображение дефектов и повреждений внутри материала.

Целью данной работы является апробация метода рентгеновской томографии для измерения площади поперечного сечения пористого материала и анализа пористости поперечного сечения образца с целью оценки внутренней структуры образцов с использованием программной среды STaп.

Методы и материалы

Традиционные методы определения и измерения пористости в металлических материалах включают 2D-рентген, секционирование и полировку, измерение плотности по Архимеду. Однако эти методы не могут обеспечить количественную оценку размера, общего объема и распределения пор [3].

В данной работе используется метод рентгеновской томографии, которая является относительно новым методом, позволяющим получить не только трехмерное изображение размеров и распределения пор, но и количественную информацию об объеме, площади поверхности, размере, форме и расположении каждой поры в металлических материалах.

Рентгеновская томография – это неразрушающий метод определения внутренней структуры изучаемого образца по набору трансмиссионных изображений в рентгеновском диапазоне [4]. Исследование рентгеновской томографии выполняется на томографе. Томограф имеет 4 базовые части: источник излучения, детектор, подвижный столик (для вращения образца) и компьютер (для обработки полученных данных). В компьютерной томографии образец удерживается на манипуляторе и поворачивается на небольшие углы во время непрерывного облучения. На рис. 1 представлена принципиальная схема работы томографа [5].

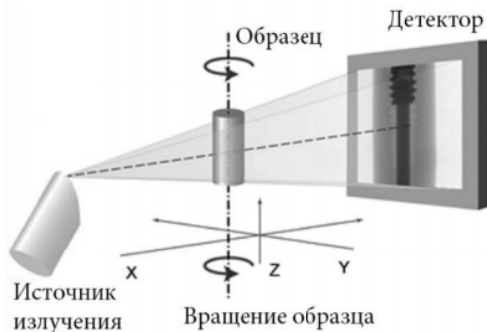


Рис. 1. Принципиальная схема получения набора трансмиссионных изображений

Пористость определяется как относительная объемная доля порового пространства в объеме материала и вычисляется по формуле [6]

$$K_{vi} = \frac{V_i}{V} \times 100 \%, \quad (1)$$

где K_{vi} – пористость, %; V_i – объем пор, мм³; V – общий объем образца, мм³.

В данной работе для оценки пористого материала определяется поперечное сечение образцов пористых сред. Отношение K_{si} произвольной площади пор S_i в поперечном сечении к общей площади сечения S определяется по формуле

$$K_{si} = \frac{S_i}{S} \times 100 \%. \quad (2)$$

Объектом исследования являются образцы из пористого материала. Металлы с пористой структурой относятся к легким материалам в виде сот, пены, губки или сетки. Пористые металлы можно разделить на две категории: металлы с закрытыми порами и металлы с открытыми порами – в зависимости от связности пор. Пористые металлы обладают низкой плотностью, большой удельной поверхностью, высокой химической активностью, отличаются звукопоглощением, теплоизоляцией, вибродемпфированием, поглощением энергии удара и электромагнитных волн и другими характеристиками, которыми не обладают традиционные металлы. Они широко применяются в традиционных и новых областях, таких как медицинские исследования, аэрокосмическая отрасль и другие высокотехнологичные направления [2].

Результаты и их обсуждение

Получение томографических данных осуществлялось с помощью рентгеновского микрокомпьютерного томографа Орел-МТ. Работа выполнена в Российско-китайской научной лаборатории радиационного контроля и досмотра (Томский политехнический университет, г. Томск). В данной работе рассматриваются три типа пористых материалов: модельный, представляющий собой набор стеклянных шариков одинакового размера, крупнопористый и мелкопористый интерметаллид. На рис. 2 показаны выделенные объемы для расчетов (VOI) у каждого образца.

В программе STaп перед расчетом выбирался объем для исследования (VOI). Для модельного образца был выбран цилиндрический объем. После сегментации, когда образец выделяется на всех изображениях, проводился 2D-анализ, при котором выполнялся расчет следующих параметров: Z-позиция, площадь пор и пористости. На рис. 3 показан процесс расчета в программе STaп.

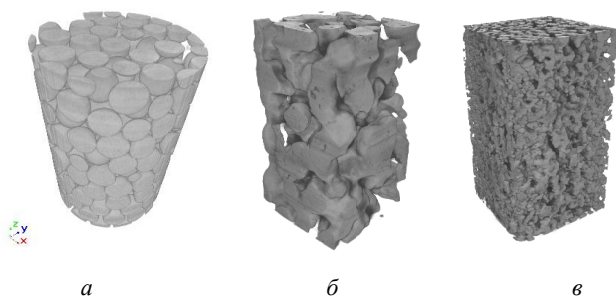


Рис. 2. Объемные трехмерные визуализации образцов: *а* – модельного (набор шариков), *б* – крупнопористого, *в* – мелкопористого интерметаллида

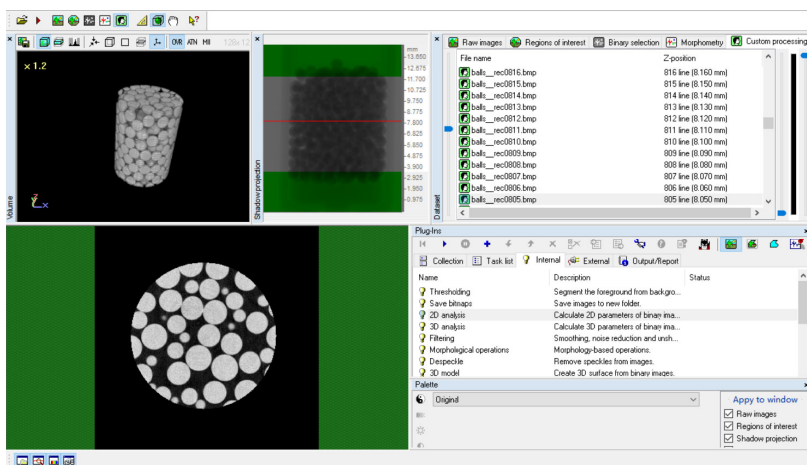


Рис. 3. Рабочее окно STaP для проведения анализа морфологических и плотностных характеристик модельного образца

На рис. 4 представлены сегментированные томограммы исследованных образцов. Для проведения сегментации использовался широко известный метод Оцу [7], реализованный в программе.

Результатом расчета являются численные значения выбранных характеристик по всем сечениям, составляющим объем исследования, то есть VOI. Результат сохраняется в текстовый файл, который потом обрабатывается в программе, работающей с таблицами, например, MATLAB. Зная координату сечения, строим графики площадей поперечного сечения

в зависимости от положения сечения. Результаты измерений в виде графиков приведены на рис. 5. В таблице приведены численные значения.

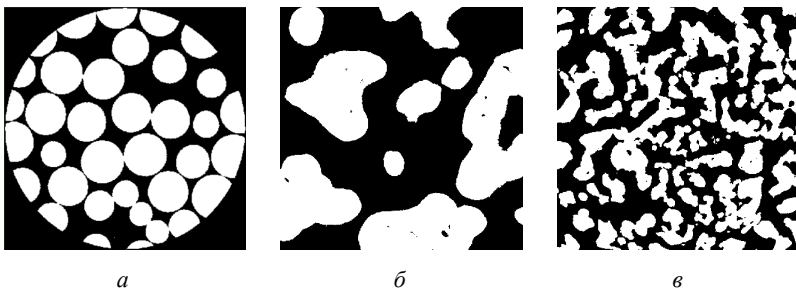


Рис. 4. Сегментированные томограммы поперечного сечения образцов: *a* – модельного, *б* – крупнопористого, *в* – мелкопористого

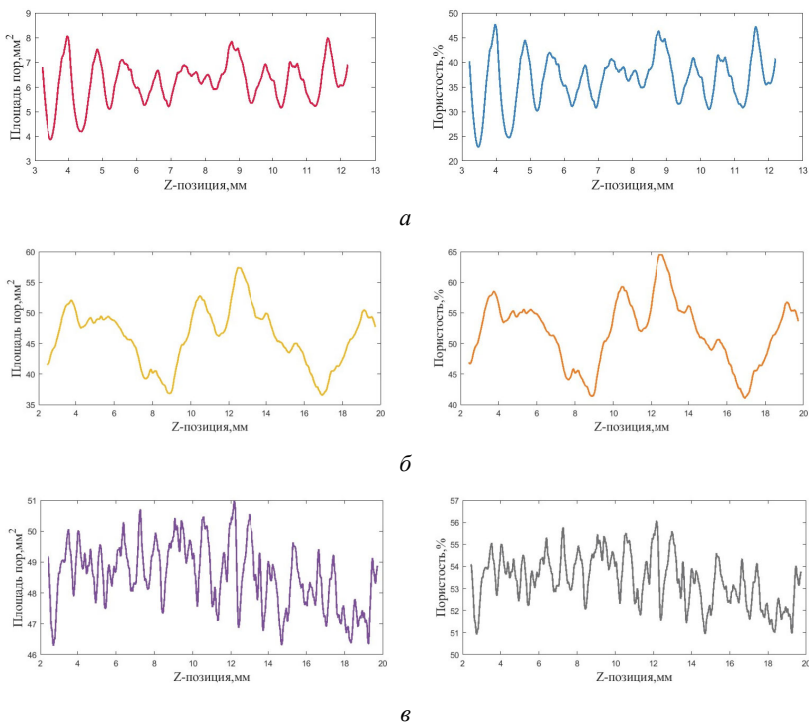


Рис. 5. Измерение площади поперечного сечения образцов: *a* – модельного, *б* – крупнопористого, *в* – мелкопористого

Таблица 1. Результаты измерения и расчета для исследования поперечного сечения пористых материалов

Образец	Площади пор S_i , мм ²		Общая площадь сечения S , мм ²	Пористость, %	
	мин.	макс.		мин.	макс.
<i>a</i>	3,87	8,06	16,93	22,86	47,61
<i>б</i>	36,54	57,39	88,94	41,08	64,53
<i>в</i>	46,30	50,97	90,93	50,92	56,05

По полученным графикам можно оценить минимальное значение площади поперечного сечения, в котором произойдет разрушение под нагрузкой. Также графики показывают равномерность структуры пористого материала. Например, в случае модельного образца можно говорить о неравномерном распределении шариков. В центральной части они насыпались более плотно, чем по краям, на что указывает график площадей поперечного сечения. Из таблицы видно, что площади пор и, соответственно, пористость сильнее варьируются для модельного и крупнопористого образцов.

Для оценки точности измерений были измерены диаметры нескольких шариков из разных участков – снизу, сверху и в середине. Размеры диаметров по томографическим данным составили $1,09 \pm 0,05$ мм. Зная, что фактические диаметры шариков равны $1,0 \pm 0,07$ мм, можно утверждать, что на применяемом оборудовании томографический метод измерения размеров обеспечивает точность не хуже 15 %.

Выводы

Проведенные эксперименты с использованием цифровых инструментов СТАп позволили провести экспресс-анализ пористого материала. В работе показана возможность использования метода рентгеновской томографии для оценки структуры пористого материала. Выполнен анализ трех типов данного материала, один из которых модельный пористый материал, представляющий собой насыпку из шариков одинакового размера. В работе представлены результаты изменения площади поперечного сечения в зависимости от положения поперечного сечения в одном направлении. Также приведены данные по изменению пористости вдоль одного из направлений в образцах. Показано, что для материала с более крупными гранулами разброс площадей поперечного сечения выше, чем для материала с мелкими гранулами. В плоскостях с минимальным значением площади поперечного сечения при прочих равных вероятность разрушения под механической нагрузкой выше, чем по другим направлениям. Томография, таким образом, позволяет выявлять наиболее уязвимые места в образцах.

Список использованных источников и литературы

1. *Календер, В.* Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображений и области клинического использования : пер. с англ. – Москва : Техносфера, 2006. – 344 с.
2. *Xu, W.* Recent Advances in Open-Cell Porous Metal Materials for Electrocatalytic and Biomedical Applications / W. Xu, Zh. Cui, Sh. Zhu // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2022. – № 58 (12). – Pp. 1527-1544. – DOI: 10.11900/0412.1961.2022.00369.
3. *Midson, S. P.* Using Micro-CT Scanning to Quantitative Characterize Porosity in High Pressure Die Castings and Semi-Solid Castings // *Solid State Phenomena*. – 2022. – Vol. 327. – Pp. 33-44. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.327.33.
4. *Ингачева, А. С.* Модели и методы рентгеновской компьютерной томографии в полихроматическом режиме : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. – Москва, 2021. – 144 с.
5. Design of the X-Ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and Its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation / A. V. Batranin, S. V. Chakhlov, D. V. Grinev, B. I. Kapranov, V. A. Klimenov // *AMM*. – 2013. – Vol. 379: – Pp. 3-10. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.379.3.
6. *Собина, Е. П.* Метрология пористости и проницаемости твердых веществ и материалов : монография. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 428 с.
7. *Otsu, N.* A threshold selection method from gray-level histograms / *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.* 9. – 1979. – Pp. 62-66.

Lingyue Ji ^{✉ a}, postgraduate student

A. V. Batranin ^{✉ b}, CSc in engineering, associate professor

E-mail: ^a lingyue@tpu.ru, ^b batranin@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Measuring the Cross-Sectional Area of a Porous Material Using X-Ray Tomography

The article describes the results of measuring the cross-sectional area of porous material by X-ray tomography. X-ray tomography is a promising non-destructive testing method that allows image analysis to characterize porous material. This paper uses CTan program to obtain the parameter of the object. The results of the study contribute to the understanding of the principles of X-ray tomography and its application methods in the field of materials science and nondestructive testing.

Keywords: porous material, computed tomography, area, porosity, non-destructive testing.

УДК 537.856: 620.179.147

С. П. Шляхтенков^{1, ✉^a}, аспирант

Т. С. Абрамова^{1, ✉^b}, аспирант

С. В. Палагин^{2, ✉^c}, менеджер ООО «ЕВРАЗ ТК»

Е-mail: ^a shlyakhtenkow@gmail.com,

^b t.abramova_sgups@mail.ru, ^c palagin@evraz.com

¹ Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

² АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк

Оценка интенсивности развития контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов вихретоковым методом

Представлены результаты сравнительной оценки изменения глубины контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов в кривых участках пути малого радиуса в процессе его эксплуатации. Сделано заключение об интенсивности развития поверхностных трещин с учетом факторов, связанных с изменением показателей состояния рельсовой колеи, поверхности головки рельса и эксплуатационных характеристик пути.

Ключевые слова: контроль вихретоковый, поверхность катания рельса, контактно-усталостные трещины, глубина трещины.

Введение

В настоящее время железнодорожный путь эксплуатируется в условиях предельных скоростей движения поездов, повышенной грузонапряженности и не всегда выполняемых регламентов и периодичности работ по текущему содержанию [1, 2]. Все это снижает надежность и безотказность важнейших элементов пути – рельсов. Задача продления ресурса железнодорожного пути имеет огромное значение для всей железнодорожной отрасли.

Износ и возникновение повреждений поверхности катания рельсов в подавляющем большинстве случаев определяется зарождением и развитием трещин контактно-усталостного характера, которые при достижении критической глубины могут привести к излому рельса. [3]. Для предупреждения образования и роста трещин необходимо с установленной периодичностью проводить исследование преддефектного состояния рельсов со сравнительной оценкой повреждаемости поверхности катания контактно-усталостными дефектами. На линейных пред-

приятнях службы пути отсутствуют методы и средства достоверной оценки глубины трещин поверхности катания. Это существенно ограничивает возможности профилактики контактно-усталостных повреждений рельсошлифовальными поездами [4] и требует разработки методик неразрушающего контроля поверхностных трещин рельсов.

Одним из распространенных методов оценки глубины трещин является вихретоковый контроль (ВТК), который основан на регистрации изменений параметров вторичного магнитного поля вихревых токов, возбуждаемых в объекте контроля первичным переменным магнитным полем вихретокового преобразователя (ВТП), и определении по их соотношению глубины трещины [5].

Целью работы является сбор и сравнительный анализ изменения глубин контактно-усталостных трещин, измеряемых в ходе ВТК поверхности катания рельсов, для установления дифференцированной системы периодичности исследований преддефектного состояния рельсов, определения зависимости развития трещин от технических и эксплуатационных характеристик рельсового пути.

Объект и методика исследований

Исследования поверхности катания головки рельсов проводились с установленной периодичностью в границах опытного участка пути, эксплуатирующегося в сопоставимых условиях (на одном перегоне). Перегон представляет собой двухпутный бесстыковой участок пути, состоящий из двух круговых кривых длиной 480 м и 240 м и радиусами 617 м и 1030 м, соответственно, а также прямого участка пути длиной 100 м. Уложенные в путь рельсы типа Р65 категории ДТ350 изготовлены по ГОСТ Р 51685, имеют грузонапряжённость 121,36 млн т брутто/год, а пропущенный тоннаж на момент последнего осмотра составлял 76,1 млн т брутто.

ВТК выполнялся в заранее установленных контрольных сечениях, по внутренним и наружным нитям исследуемого пути. При осмотре участков пути на поверхности катания рельсов визуально идентифицировались повреждения в виде сетки микротрещин. Трещины сканировались с использованием вихретокового дефектоскопа «Вектор-60Д» и вихретокового преобразователя ПВР-1. Вихретоковый дефектоскоп предварительно настраивался на образце с естественным дефектом – трещиной глубиной 0,1 мм, при частоте возбуждения вихревых токов 100 кГц.

Влияние угла наклона преобразователя, шероховатости поверхности на измеряемые сигналы устранялось реализацией амплитудно-фазового способа отстройки от мешающих факторов ВТК. Поверхность катания сканировалась вдоль продольной оси рельса посередине и со смещени-

ем на (15 ± 1) мм в сторону рабочей выкружки рельса (рис. 1). Для выходных сигналов ВПТ на длине (150 ± 5) мм фиксировались амплитуда A и фаза φ .

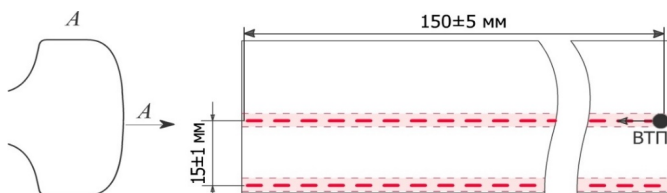


Рис. 1. Схема характерных мест сканирования головки рельса (красная пунктирная линия)

Глубина контактно-усталостных трещин определялась косвенным методом, используя зарегистрированное изменение основных информативных параметров выходных сигналов ВТК на контролируемом участке (относительно выходных сигналов на бездефектном участке) по градуировочным характеристикам, предварительно полученным с помощью образцов с реальными трещинами разной глубины в предыдущих исследованиях [6]. Далее проводился сравнительный анализ результатов измерений глубины трещин, полученных за все время проведения исследований на данном участке пути.

Результаты исследований

После обработки массива данных ВТК для каждого исследуемого сечения определялись:

- линейная плотность контактно-усталостных трещин на единицу длины, максимальная и средняя глубина, СКО в выборке (таблица);
- распределение трещин по глубине с использованием частотного анализа выборки глубин трещин рассматриваемого диапазона (рис. 2, а).

Динамика изменения измеряемых показателей

Показатель	Значение			
	01.11.22	16.02.23	23.03.23	23.05.23
Количество трещин, шт.	13	29	37	28
Максимальная глубина, мм	0,28	0,71	0,71	1,03
Средняя глубина, мм	0,16	0,42	0,44	0,62
СКО, мм	0,09	0,18	0,13	0,33

Для рассматриваемого сечения в зоне рабочей выкружки рельса на момент измерений 23.05.23 зарегистрированы сигналы от 28 трещин

(таблица, рис. 2, б), глубина трещин изменяется в диапазоне от 0,10 до 1,00 мм (19 % от всей выборки)*, среднее значение 0,32 мм (20 %).

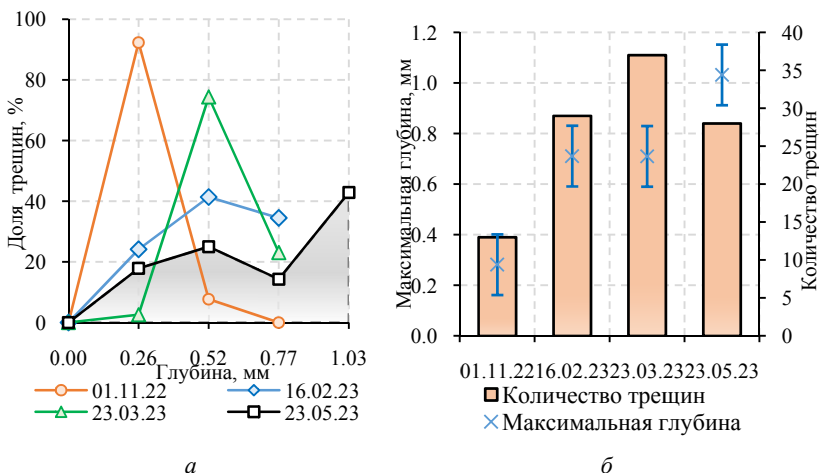


Рис. 2. Изменение распределения трещин по глубине (а) и изменение количества трещин и их максимальной глубины (б)

Анализ результатов

Уменьшение количества зафиксированных трещин (рис. 2, б) на момент 23.05.23 связано с увеличением их линейной плотности, превышающей разрешающую способность дефектоскопа, что накладывает ограничения на раздельную регистрацию сигналов при контроле сетки трещин.

В сравнении с предыдущими измерениями при увеличении пропущенного тоннажа распределение трещин по глубине сместилось в область больших значений. При этом результаты измерения глубины трещин 16.02.23 практически не имеют отличий в сравнении с результатами 02.07.2023, что связано с относительно минимальной наработкой (8,3 млн т брутто) рельсов в рассматриваемый промежуток времени. Вариация экспериментальных данных не превышает диапазон доверительных границ погрешности (перекрытие границ составляет более 90 %) и связана с воздействием мешающих факторов ВТК.

* В скобках указано процентное выражение количества трещин (рассматриваемого диапазона), которые попадают в интервал глубин, удовлетворяющий оцениваемому показателю (средняя или максимальная глубина).

Средняя глубина трещин в рабочей выкружке рельса круговой кривой радиусом 617 м составляет 0,6 мм, интенсивность развития составила 0,006 мм на млн т брутто.

Выводы

Реализованный способ ВТК на частоте 100 кГц позволяет определять глубину поверхностных трещин до 0,9 мм с погрешностью не более 0,12 мм, что соответствует ошибке при планировании работ на 1–3 прохода машины РШП-48 № 001. Максимальная чувствительность ВТК к глубине трещины наблюдается в диапазоне от 0,05 до 0,6 мм.

Критерием для назначения работ по устранению сетки трещин (рельсошлифование) являются результаты диагностики внутренней нити криволинейных участков пути. Трещины, обнаруженные в рабочей выкружке рельса наружной нити, устраняются в результате интенсивного бокового износа, а срок службы рельсов определяется развитием дефекта кода 44.

Список использованных источников и литературы

1. Исследование продольных напряжений в железнодорожных рельсах методом акустоупругости / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, С. А. Бехер, С. И. Кабанов, Е. С. Тенитилов, В. В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. – 2023. – № 2. – С. 33–40. – DOI: 10.31044/1814-4632-2023-2-33-40. – EDN ESFSXF.
2. Study on the effect of residual stresses on fatigue crack initiation in rails / Yang Li, Jinjie Chen, Jianxi Wang et al. // International Journal of Fatigue. – 2020. – No. 139. – P. 105750.
3. Кулманова, Н. К. Определение скорости роста усталостных трещин в стальных рельсах и плетях, сваренных электроконтактным способом / Н. К. Кулманова, Б. К. Каскин // Вестник АО «КазНИИСА». – 2020. – № 4. – С. 52–58. – EDN YQZZGR.
4. Оценка эффективности использования рельсошлифовальных поездов / А. С. Ильиных, А. С. Пикалов, Е. О. Юркова, В. К. Милорадович // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 9. – С. 19–22. – EDN MCESEU.
5. Eddy Current Probe Configuration for Full Rail Top Surface Inspection / A. Aouf, B. Tarik, A. Abdelhak. et al. // Instrumentation Measure Metrologie. – 2021. – Vol. 20. – No. 2. – Pp. 65–72. – DOI: 10.18280/i2m.200201.
6. Возможности ручного вихретокового контроля для измерения глубины контактно-усталостных трещин поверхности катания рельсов / С. П. Шляхтенков, Д. Б. Некрасов, С. В. Палагин, О. В. Бессонова, А. А. Попков, С. А. Бехер // Дефектоскопия. – 2023. – № 4. – С. 37–45. – DOI: 10.31857/S0130308223040036. – EDN YHPZUU.

S. P. Shlyakhtenkov^{1, ✉^a}, postgraduate student

T. S. Abramova^{1, ✉^b}, postgraduate student

S. V. Palagin^{2, ✉^c}, manager of EVRAZ TK LLC

E-mail: ^a shlyakhtenkov@gmail.com,

^b t.abramova_sgups@mail.ru, ^c palagin@evraz.com

¹ Siberian State University of Railway Engineering, Novosibirsk

² EVRAZ ZSMK JSC, Novokuznetsk

Assessment of the Intensity of the Development of Contact Fatigue Cracks of the Rolling Surface of Rails by the Eddy Current Method

The results of a comparative assessment of changes in the depth of contact fatigue cracks of the rolling surface of rails in curved sections of a small radius track during its operation are presented. The conclusion is made about the intensity of the development of surface cracks, taking into account factors related to changes in the state of the rail track, the surface of the rail head and the operational characteristics of the track.

Keywords: eddy current control, rail rolling surface, contact fatigue cracks, crack depth.

Секция 4. Радиотехника, связь, информационные технологии

УДК 001.891.57

И. А. Арсланов ✉, студент

Д. И. Плешаков, студент

Е. Г. Булатова, канд. физ.-мат. наук, доц.

А. А. Богданов, канд. техн. наук, доц.

E-mail: arslanovildar0@gmail.com

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

Сравнительный анализ частотных характеристик электрических цепей, полученных экспериментально и с использованием стандартных пакетов прикладных программ

В статье исследованы возможности использования прикладных программ MicroCap, Multisim, Qucs для моделирования частотных характеристик электрических цепей в учебном процессе по дисциплине «Теоретические основы электротехники». Был проведен сравнительный анализ частотных характеристик, смоделированных в разных программах, с частотными характеристиками, полученными экспериментально.

Ключевые слова: сравнительный анализ, амплитудно-частотная 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 [1]. 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 программах моделирования. Но возникает вопрос, насколько они достоверно передают реальное поведение схем. В данной работе нами проведен сравнительный анализ измеренных частотных характеристик реальных фильтров с их электронными моделями в различном программном обеспечении для персональных компьютеров: MicroCap 12.02.05 [2], NI Multisim 14.2 [3], Qucs 0.0.19 [4–5].

Результаты измерений на реальных фильтрах

Для сравнительного анализа были собраны фильтр нижних частот (рис. 1) и фильтр верхних частот (рис. 2).

Для сборки фильтра нижних частот использовались: три резистора номиналом в 10кОм, два конденсатора номиналом 2,2 нФ и конденсатор 330 нФ, для фильтра верхних частот: три резистора номиналом 10 кОм и конденсаторы номиналом 10 нФ.

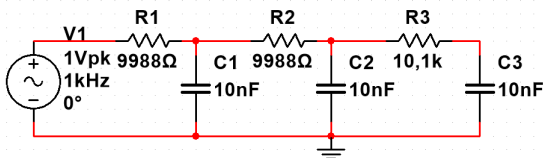


Рис. 1. Схема фильтра нижних частот

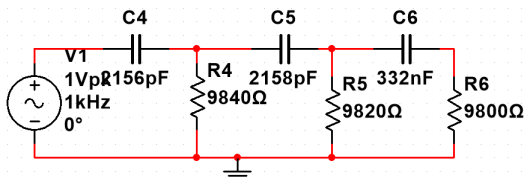


Рис. 2. Схема фильтра верхних частот

Перед сборкой схемы были проведены измерения реальных значений используемых компонентов. Результаты измерений элементов приведены в табл. 1. Компоненты с индексами 1–3 использовались в фильтре нижних частот, компоненты с индексами 4–6 использовались в фильтре верхних частот.

Таблица 1. Результаты измерений реальных значений используемых компонентов

Индекс	Сопротивление резисторов,	Ёмкость конденсаторов
1	9988 Ом	10 нФ
2	9988 Ом	10 нФ
3	10,1 Ом	10 нФ
4	9840 Ом	2156 пФ
5	9820 Ом	2158 пФ
6	9800 Ом	332 нФ

Таблица 2. Результаты измерений частот реальной схемы для конкретных значений амплитуд

Амплитуда на выходе фильтра, мВ	Частота напряжения на входе, Гц	Абсолютная погрешность измерения, Гц	Относительная погрешность измерения, %
Фильтр нижних частот			
950	126,6	5,19	4,10
707	341	6,63	1,94
500	581,8	5	0,86
100	2747	52,04	1,89
Фильтр верхних частот			
950	111 250	4114,75	3,70
707	35414	786,54	2,22
500	20226	446,04	2,21
100	3621,6	195,98	5,41

После сборки схемы на установке, состоящей из генератора GW INSTEK SFG-2104 с установленной амплитудой в 1 вольт, подключенного к входу фильтра, и осциллографа R&S HMO1002 Series, подключенного к выходу фильтра, проводим измерения АЧХ двух фильтров. Результаты измерений опорных точек приведены в табл. 2.

Значение амплитуды в 100 мВ принималось как полное подавление сигнала, значение амплитуды в 950 мВ принималось как полное пропускание сигнала. Амплитуда в 707 мВ соответствует граничной частоте фильтра, а 500 мВ – середина переходной полосы.

Результаты сравнительного анализа

После измерения реальных фильтров были проведены моделирования фильтров в MicroCAP, NI Multisim, Qucs. Результаты занесены в табл. 3.

Значения частот были получены курсорным методом с количеством точек на декаду, равным 100, и с общим количеством точек на весь график, равным 1001.

Таблица 3. Результаты измерений частоты схемы при симуляции

Установленное значение амплитуды, мВ	Реальное значение частоты, Гц	Значение частоты по MicroCap 12.02.05, Гц	Значение частоты по NI Multisim 14.2, Гц	Значение частоты по Qucs 0.0.19, Гц
Фильтр нижних частот				
950	126,6 ± 5,1	102,0 ± 0,6	100,0 ± 0,8	101,0 ± 3,0
707	341,0 ± 6,6	314,0 ± 1,8	308,0 ± 2,4	312,0 ± 9,4
500	581,8,0 ± 5,0	528,0 ± 3,2	524,0 ± 4,2	521,0 ± 15,6
100	2747,0 ± 52,0	2125,0 ± 12,7	2151,0 ± 17,2	2160,0 ± 64,8
Фильтр верхних частот				
950	111250,0 ± 4114,7	106690,0 ± 640,0	101511,0 ± 812,0	105000,0 ± 3150,0
707	35414,0 ± 786,5	34603,0 ± 207,0	33500,0 ± 268,0	34700,0 ± 1041,0
500	20226,0 ± 446,0	20184,0 ± 121,0	19442,0 ± 155,5	20000,0 ± 600,0
100	3621,6 ± 195,9	4406,0 ± 26,4	4179,0 ± 33,4	4370,0 ± 131,0

Для более наглядного представления результатов были построены полные графики АЧХ в одних осях. Графики приведены на рис. 3 и 4.

При анализе результатов таблицы разное программное обеспечение дает близкие друг к другу значения при учете шага модуляции. Отклонение значений промоделированных фильтров составило до 22 % от реальных значений.

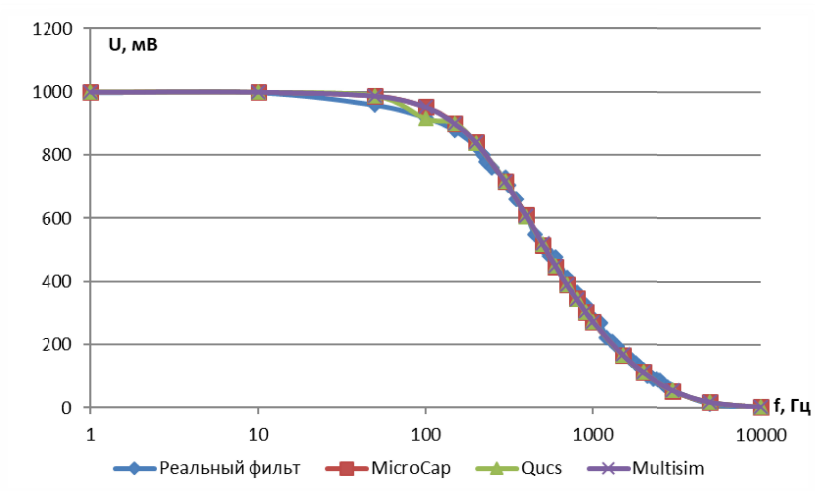


Рис. 3. Графики АЧХ фильтра нижних частот

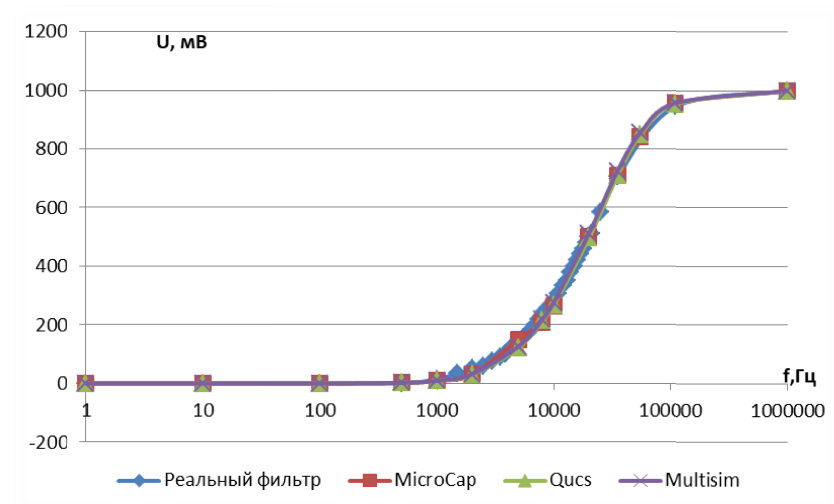


Рис. 4. Графики АЧХ фильтра верхних частот

Вывод

В результате проведенного сравнительного анализа отклонение значений частотных характеристик промоделированных фильтров составило максимально 22 % от реальных значений, полученных в эксперименте. Все модели фильтров в рассмотренных программах показали относительно одинаковые результаты АЧХ. Все они передают ее характер и форму. Отклонение значений частот между ними не превысило 2–3 Гц. Таким образом, моделирование можно использовать для изучения частотных характеристик электрических цепей независимо от программного обеспечения.

Список использованных источников и литературы

1. Сидорина, В. А. Организация самостоятельной работы студентов радиотехнического профиля с использованием технологии скринкастинга / В. А. Сидорина, П. В. Салтыков, Г. И. Ильязова // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф., Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 611–615. – EDN YVDJSH.
2. Амелина, М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.: ил.

3. *Загидуллин, Р. III*. Multisim, Labview, Signal Express. Практика автоматизированного проектирования электронных устройств. – Москва : СИНТЕГ. – 2009. – 368 с.

4. *Кечиев, Л. Н.* Моделирование в среде Qucs развязывающих конденсаторов в составе распределенной системы питания цифровых модулей / Л. Н. Кечиев, Д. С. Шатов // Технологии ЭМС. 2014. Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости : тр. II Всерос. НТК «Техно-ЭМС 2014», Москва 1–2 апр. 2014 г. – Москва : Грифон, 2014. – С. 36–44.

5. *Кузнецов, В. В.* Qucs: Использование свободного ПО для моделирования электронных схем в учебном процессе / В. В. Кузнецов, Н. М. Крючков // XI конференция разработчиков свободных программ : тез. докл. Калуга, 26–28 сент. 2014 г. – Москва : Альт Линукс, 2014. – С. 114–120.

I. A. Arslanov ✉, student

D. I. Plehakov, student

E. G. Bulatova, CSc in phys. and math., associate professor

A. A. Bogdanov, CSc in engineering, associate professor

E-mail: arslanovildar0@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Comparative Analysis of Frequency Characteristics of Electrical Circuits Obtained Experimentally and Using Standard Application Software Packages

The article investigates the possibilities of using MicroCap, Multisim, Qucs application programs for modeling the frequency characteristics of electrical circuits in the educational process in the discipline of TOE. A comparative analysis of the frequency characteristics modeled in different programs with the frequency characteristics obtained experimentally was carried out. The simulation results showed that the deviation of the values of the simulated filters was up to 22% of the real values.

Keywords: Comparative analysis, amplitude-frequency response, low pass filter, high pass filter.

УДК 004.93

Д. В. Булдаков [✉], магистрант
М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц.
E-mail: dan.buldakov@yandex.ru

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

Исследование применения методов машинного обучения для распознавания лиц

В статье рассматриваются методы машинного обучения, используемые для распознавания лиц людей. Основой данных методов являются языки программирования высокого уровня. Описаны принципы работы методов и их практическое применение. Проведено сравнение методов. Выделены преимущества и недостатки. В статье авторы описывают несколько групп методов машинного обучения на основе: геометрических признаков, статистических моделей, нейронных сетей, глубокого обучения, деревьев решений. Проведен сравнительный анализ методов, показана точность распознавания каждого из методов. Представлена собственная методика распознавания и результаты ее работы.

Ключевые слова: распознавание лиц, машинное обучение, нейронные сети, глубокое обучение, идентификация личности.

Введение

На сегодняшний момент мы не можем представить нашу жизнь без информационных технологий, которые упрощают ее, экономят время и ресурсы. Одной из таких технологий является биометрическое распознавание лиц при помощи камеры. Данный метод использует беспроводное подключение, не требует ношения при себе специальных карт или ключей доступа, может охватывать сразу несколько помещений, что исключает возникновение очередей [1, 2].

Благодаря перечисленным преимуществам, технология применяется в сферах обеспечения безопасности [3], медицине [4], промышленности. Многие люди в качестве защиты своих персональных данных выбирают именно распознавание лица при выборе способа блокировки своих устройств.

Для реализации программного решения распознавания лиц применяются языки программирования высокого уровня, искусственный интеллект и методы машинного обучения, которые обеспечивают достаточно

высокую производительность и точность идентификации, способны к совершенствованию. Особую популярность получили нейронные сети, метод главных компонент и глубокое обучение.

Рассмотрим основные существующие решения, их преимущества и недостатки, сравним точность и быстродействие. Предлагается использовать классификацию методов машинного обучения на основе: геометрических признаков, статистических моделей, нейронных сетей, глубокого обучения, деревьев решений. Выделим основные этапы для решения задачи.

Постановка задачи

В рамках данной статьи стоит задача – провести исследование для оценки преимуществ существующих методов машинного обучения для распознавания лиц, на основе которых будет разработана собственная система.

Для достижения поставленной задачи требуется:

- произвести обзор существующих методов машинного обучения;
- проверить данные методы на практике;
- выявить преимущества и недостатки в работе алгоритмов;
- определить методы, которые наиболее точно идентифицируют человека с оптимальной скоростью.

Классификация методов распознавания лиц

С развитием информационных технологий, искусственного интеллекта и появлением новых библиотек и модулей в языках программирования существует большое количество методов для выделения и распознавания лиц людей.

Все они имеют свои преимущества и недостатки, благодаря которым разработчик получает возможность выбрать оптимальный метод для выполнения конкретной задачи и достижения целей [5].

Каждый метод по-своему уникален, соблюдает определенные требования, для того чтобы обеспечить точность результата. Для получения высокого качества распознавания лиц и быстродействия пользователь должен учитывать множество факторов. К ним относятся освещение, ракурс, поза и жесты, головные уборы и очки, причёска и растительность на лице, деятельность человека в кадре.

В машинном обучении для идентификации человека применяются уникальные особенности и черты лица. Например, расстояние между глазами, ширина рта, оттенок кожи, контур лица и так далее. Методы определяют данные параметры и используют в работе. Общий алгоритм представлен на рис. 1:



Рис. 1. Алгоритм распознавания

В классификации существуют алгоритмы, которые используют геометрические признаки с целью распознавания. Рассмотрим данные методы.

Методы на основе геометрических признаков

Один из наиболее популярных – это *метод главных компонент (Principal Component Analysis)*. Он основан на преобразовании пространства признаков, чтобы найти новые оси, называемые главными компонентами. В случае распознавания лиц PCA сжимает изображение и извлекает наиболее важные и информативные геометрические признаки [6, 7]. Библиотеки scikit-learn и OpenCV предоставляют инструменты для реализации в Python.

Еще одним примером может служить *градиентная гистограмма ориентированных границ (Histogram of Oriented Gradients)*. Этот метод извлекает градиентные ориентации и границы изображения, чтобы создать дескрипторы лица. Затем эти дескрипторы сравниваются с дескрипторами в базе данных для распознавания [8]. В программном обеспечении может применяться библиотека dlib. Обратим внимание на следующую группу.

Методы на основе статистических моделей

Метод гауссовых смесей (Gaussian Mixture Model), который моделирует распределение признаков лица с помощью комбинации нескольких гауссовских распределений. В контексте распознавания лиц GMM может быть применен к набору признаков, чтобы построить статистическую модель, которая описывает вариацию в тренировочном наборе данных для дальнейшей идентификации пользователя.

Скрытые модели Маркова (Hidden Markov Models) моделируют последовательность данных с неизвестными состояниями. В целях распознавания способ применяет динамику изменения лица, освещения, позы и выражения за определенный промежуток времени. НММ представляет собой набор скрытых состояний, каждый из которых соответствует определенной характеристике лица [9]. В работе метода применяются вероятностные матрицы. Сначала модель обучается на готовом наборе данных изображений, а затем классифицирует новые. Обратим внимание на наиболее популярные методы, используемые большинством разработчиков в настоящее время.

Нейронные сети

Сверточные нейронные сети (Convolutional neural network) используются для извлечения признаков из фотографий людей и их применения. В последнее время данным способом пользуются все больше разработчиков. Основой метода служат специальные слои свертки, которые дают возможность автоматически извлекать наиболее значимые признаки лица человека. Во время работы нейронные сети применяют фильтры, чтобы обнаружить границы и форму головы [10]. Далее полученные данные подаются на полносвязные слои классификации лиц на основе обучающих данных для последующей классификации лиц на основе обучающих данных [11].

Рекуррентные нейронные сети (Recurrent neural network) выгодно отличается от CNN тем, что метод способен учитывать контекстную информацию при обработке данных. Это особенно полезно при работе с множеством пикселей изображения лица. Данный способ пользуется специальными слоями, называемыми рекуррентными, которые позволяют передавать информацию из предыдущего шага обработки к текущему, что позволяет учитывать зависимость пикселей на картинке и лучше распознавать их [10]. Для реализации более тяжелых и требовательных проектов к сверточным нейронным сетям добавляется глубокое обучение.

Глубокое обучение (Deep learning)

Глубокие сверточные нейронные сети (Deep CNN) – более глубокие и сложные нейронные сети, способные извлекать признаки высокого уровня из изображения или видео. Обучаются на больших наборах данных. Такой подход автоматически извлекает признаки из изображения лиц, что способствует более точной классификации [12]. Глубокое обучение позволяет модели адаптироваться и подстраиваться к различным условиям съемки, освещению, выражениям лиц.

Генеративно-сопоставительные сети (Generative Adversarial Networks), которые могут генерировать новые изображения лиц или улучшать качество существующих изображений. Метод представляет собой двухкомпонентную модель, состоящую из генератора и дискриминатора. Генератор создает новые изображения, приближенные к реальным. Дискриминатор сравнивает их и вычисляет сгенерированные лица. Обучение метода проходит до момента достижения генератором создания реалистичных фотографий. Несмотря на обилие способов и алгоритмов, в особых случаях программисты применяют древовидную структуру.

Деревья решений

«Случайный лес» (*Random forest*) работает путем построения множества структур в виде дерева, каждая из которых принимает решение о принадлежности объекта к определенному классу. Далее, путем комбинирования и анализа решений отдельных деревьев, выводится окончательное решение, которое способствует более точному распознаванию [13]. Также существует метод *повышения градиента (Gradient boosting)*, который использует несколько моделей структур деревьев. Каждая следующая модель строится таким образом, чтобы учитывать ошибки предыдущих моделей, получая лучшее решение. В целях выявления достоинств и недостатков методов, их точности и быстродействия применим их на практике.

Решение задачи

Для проверки работы методов на практике и выявления наиболее подходящего авторами был использован язык программирования высокого уровня Python и его библиотеки и модули, такие как *dlib*, *OpenCV*, *TensorFlow*, *sklearn*, *face_recognition* и другие. В качестве сред разработки выбраны *Google colab* и *Anaconda* из-за своей доступности.

Набор входных данных представляет собой множество фотографий людей с разными ракурсами, выражениями лица и степенью освещенности. Всегда есть возможность воспользоваться сайтами Kaggle и ImageNet, на которых содержится большое количество баз данных и датасетов на любой вкус.

Выявленные преимущества и недостатки, точность и время распознавания каждого из рассматриваемых методов отражены в таблице. Проанализировав методы на практике, были выбраны методы с использованием нейронных сетей и глубокого обучения благодаря высокой и стабильной точности идентификации людей.

Сравнительный анализ методов распознавания

Методы	Точность (accuracy), %	Преимущества	Недостатки
PCA	80–85	Оптимизирован для больших баз данных, набор вариаций	Требуются изображения высокого качества, зависимость от освещения в кадре
HOG	75–83	Нормализует контрастность для повышения точности распознавания	Высокое время работы, восприимчивость к освещению
GMM	83	Работа с неполным изображением, учет искажений	Высокое время работы
HMM	82–87	Учет последовательности признаков и их зависимость	Разброс параметров модели для каждой базы данных
CNN	более 90	Устойчивость к помехам и шумам	Обучение и переобучение ИИ
RNN	90–99	Высокая точность распознавания как фото, так и видео	Восприимчивость к градиенту, время распознавания
DCNN	~95	Высокая точность идентификации и обнаружения, практическая ценность	Переобучение сети при добавлении новых изображений, требование к мощной конфигурации ПК
GAN	60–90	Обучение без учителя	Необходим большой набор изображений высокого качества (более 10 000)
RF	66–87	Использование нескольких структур, обработка шума и помех	Трудная реализация, низкая практическая применимость

Большим плюсом стоит выделить возможность самообучения. Наличие множества библиотек в Python позволяет разработчику создать собственный продукт. Но есть и недостатки. Для их решения авторами

предлагается использовать нейронную сеть YOLO (You Only Look Once) [14], которая является одной из лучших в обнаружении [10]. В первую очередь требуется распознать в окружении людей и их лица на фото, выделив в рамку. Требуется выполнить разметку объектов на изображении и разбить их на классы, группы. Авторы использовали инструмент сайта CVAT. Пример разметки объектов на классы «люди» и «машины» представлен на рис. 2.

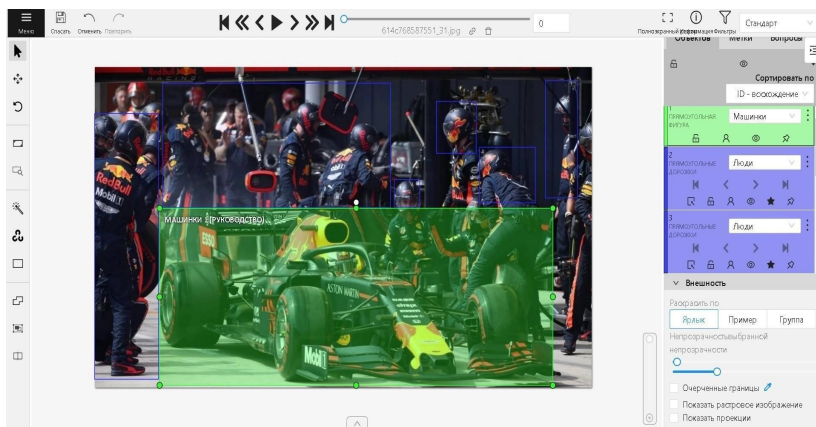


Рис. 2. Разметка изображения

Данный шаг существенно ускорит процесс распознавания лиц нейронной сетью, в котором будет идентификация личности человека, выведения его имени на экране в рамке. Далее готовые файлы сохраняются в формате json, которые нужно обработать и изъять численные координаты ширины и длины, координаты центра выделенных прямоугольников. Полученные данные записываются в текстовые файлы.

Впоследствии файлы и фотографии помещаются в обучающую и тестовую выборку. Дальнейшие шаги выполнены согласно решению, описанному в статье [15]. YOLO правильно выделила около 85–89 % на фотографиях. В остальных случаях люди были приняты за другие объекты или не распознаны. Результат обученной работы нейронной сети показан на рис. 3.

Итоговым шагом является непосредственная идентификация личности человека. С этой целью использовалась модель, описанная в статье [16], с использованием глубокого обучения, библиотеки dlib и модуля face_recognition. Пример верного распознавания лица человека представлен на рис. 4, где на маркировке указано имя человека.

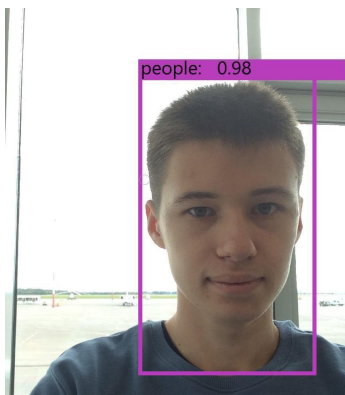


Рис. 3. Результат обозначения лица нейронной сетью YOLO

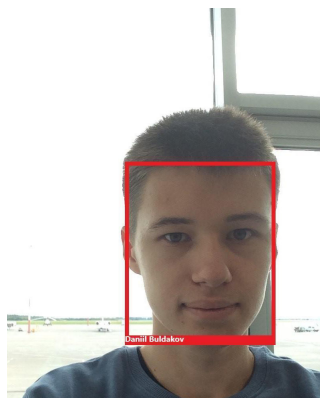


Рис. 4. Верное распознавание лица системой

Таким образом, нам удалось применить нейронную сеть YOLO и глубокое обучение для распознавания. Тестирование показало, что метод обеспечивает достаточно высокую точность и быстродействие, но ошибается при работе с изображениями низкого качества, размытыми фото, с плохой освещенностью. Авторы планируют использовать данный метод для реализации системы автоматического мониторинга посещаемости контактных занятий в учебном заведении. Практическое применение может быть полезным в медицине, безопасности, маркетинге и т. д.

Выводы

В результате написания статьи были рассмотрены методы машинного обучения для распознавания лиц, произведен их сравнительный анализ. Авторами было выбрано использовать нейронные сети и глубокое обучение. Была обучена нейронная сеть YOLO и модель глубокого обучения на собственном наборе изображений. Приведены результаты верной работы системы. В последующих исследованиях авторы планируют использовать и улучшать систему для собственной системы распознавания.

Список использованных источников и литературы

1. *Buldakov, D. V.* An Overview of Attendance Monitoring Methods Exploiting Artificial Intelligence and the Internet of Things / D. V. Buldakov, M. A. Al Akkad // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании. Молодежный научный форум : сб. тр. Всероссийской научно-технической конференции / ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – Ижевск : Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2023. – С. 505–510.
2. *Салех Лабиб, О. А.* Методы распознавания лиц на основе анализа видеозаписей / О. А. Салех Лабиб, С. В. Хлопин // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2023. – Vol. XXVI, no. 2. – Pp. 132–141. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-89.
3. *Козловский, А. В.* Система распознавания девиантного поведения в видеопотоке с использованием нейронных сетей и других методов машинного обучения / А. В. Козловский, В. И. Волощук, Я. Э. Мельник // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 77–82.
4. *Порошков, К. Н.* Место нейросетей в системах распознавания // Наука и образование сегодня. – 2023. – № 2 (76). – С. 7–10.
5. *Shukla, R. K.* Comparative Analysis of Machine Learning Based Approaches for Face Detection and Recognition / R. K. Shukla, A. K. Tiwari // Journal of Information Technology Management. – 2021. – № 13 (1). – Pp. 1-21.
6. *Sunita, N.* Face Recognition Using Principal Component Analysis // International Journal of computer science and Information technology. – 2014. – Vol. 5. – Pp. 6491-6496.
7. *Nath, R. R.* Face Detection and Recognition Using Machine Learning Algorithm / R. R. Nath., K. Kakoty., D. J. Bora // J. Soft Comput. Data Min. – 2021. – Vol. 43, no. III. – Pp. 194-197.
8. Классификация методов обнаружения и распознавания лица на изображении / Д. А. Кузнецов, П. Г. Никольский, Д. С. Рачков [и др.] // Научный результат. Информационные технологии. – 2019. – Т. 4, № 1. – С. 38–46. – DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-1-0-6. – EDN ORQZRJ.
9. *Boranbayev, S. N.* Development a system for classifying and recognizing person's face / S. N. Boranbayev, M. S. Amirtayev // Eurasian Union Scientists. – 2020. – Vol. 4. – Pp. 15-24.
10. *Нгуен, Т. К.* Модель метода распознавания объектов на изображениях с использованием «сверточной нейронной сети – CNN» / Т. К. Нгуен, В. И. Сы-

рямкин, Ч. Х. Т. Нгуен // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12 (Ч. 2). – С. 269–280. – DOI: 10.17513/snt.38445.

11. Ляхов, А. Л. Искусственная нейронная сеть как измерительный инструмент адекватности модели с адаптивным классом точности / А. Л. Ляхов, С. П. Алешин // Математические машины и системы. – 2010. – Т. 1, №. 2. – С. 61.


12. Филиппенко, В. А. Использование машинного обучения для глубокого распознавания лиц / В. А. Филиппенко, А. В. Зотов // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 1 (22). – С. 59–62.

13. Salhi, A. I. Fast and efficient face recognition system using random forest and histograms of oriented gradients / A. I. Salhi, M. Kardouchi, N. Belacel // Proceedings of the International Conference of the Biometrics Special Interest Group, BIOSIG 2012. – 2012. – Pp. 1-11.

14. Aiman, Al Akkad, M. Exploiting Deep Learning Methods for Object Recognition and Grasping Tasks / M. Aiman Al Akkad, A. Rawan // AIP Conference Proceedings, Izhevsk, 24–26 нояб. 2021 г. Vol. 2605. – Izhevsk: Published by AIP Publishing, 2023. – P. 020002. – DOI: 10.1063/5.0112973. – EDN AKXQBO.

15. Alexey Bochkovskiy. YOLOv4 – самая точная real-time нейронная сеть на датасете Microsoft COCO // Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/post/503200/> (дата обращения: 26.10.2023).

16. JalFaizy Shalikh. Building a Face Detection Mode from Video using Deep Learning (Python Implementation) Analytics Vidhya. – URL: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2018/12/introduction-face-detection-video-deep-learning-python/> (дата обращения: 24.10.2023).

D. V. Buldakov , master student

M. A. Al Akkad, CSc in engineering, associate professor

E-mail: dan.buldakov@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Research on the Application of Machine Learning Methods for Face Recognition

This article discusses machine learning methods used for facial recognition. These algorithms are based on high-level programming languages. The authors describe the theoretical principles of the methods and their practical application. A comparison was made based on the criteria of recognition accuracy and performance. In the article, the authors propose the following classification of machine learning methods based on: geometric features, statistical models, neural networks, deep learning, decision trees. The comparative analysis of methods is carried out, the recognition accuracy of each method is shown. Our own method of recognition and its results are presented.

Keywords: face recognition, machine learning, neural networks, deep learning, identity verification.

УДК 004.832.28

И. Д. Литвинов [✉], магистрант

М. А. Аль Аккад, канд. техн. наук, доц.

E-mail: ilvin.litvinov@yandex.ru

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

Исследование практического применения субтитров в видео для людей с нарушением слуха

В данной статье исследуется практическое применение субтитров в видео для слабослышащих. Применение субтитров в видео для людей со слабым слуховым аппаратом является наиболее острой проблемой в нашем обществе, для решения этой проблемы создаются эффективные алгоритмы, которые являются важными исследовательскими направлениями. Статья предоставляет обзор на способы реализации субтитров в видео для людей с нарушением слуха. В качестве решения этой проблемы были предложены два метода: одномерные сверточные модели нейронных сетей и сверхточные нейронные сети с рекуррентными нейронными сетями, чтобы обеспечить лучшее восприятие видео людьми с нарушениями слуха. Голос будет преобразован в субтитры с учётом паралингвистической и экстралингвистической информации, где к некоторым фразам или звукам в окружающей среде будет добавлен постскрипtum.

Ключевые слова: люди с нарушением слуха, сверточные нейронные сети, рекуррентные сети, преобразование голоса в субтитры, паралингвистическая и экстралингвистическая информация.

Введение

Видео сегодня является одним из самых распространенных способов представления информации. Помимо таких классических видеопродуктов, как художественные и документальные фильмы и передачи длительностью от 40 мин, сегодня для пользователей интернета доступны самые разные форматы видео (блоги, шортцы, стримы, трансляции и т. д.) информационного, обучающего и развлекательного характера. Однако просмотр данных видео для людей с нарушением слуха становится невозможным без надлежащей адаптации. Традиционное решение этой проблемы: замещение канала восприятия информации со слухового на визуальный. То есть использование дубляжа для передачи информации, содержащейся в видео, с применением субтитров или жестового

языка. Первое решение: генерация субтитров, считается более лёгким для технического исполнения. Кроме того, контрольные цифры «произведенных и транслированных субтитров для субтитрирования телевизионных программ» законодательно установлены для общероссийских обязательных общедоступных каналов Федеральным законом от 30.10.2018 № 380-ФЗ «О внесении изменений в статью 31 Закона Российской Федерации «О средствах массовой информации» [1].

Сегодня существует достаточное количество сервисов, осуществляющих преобразование видео или аудио в текст, который может быть использован в качестве субтитров. Однако субтитры для глухих и слабослышащих людей имеют свои особенности как в технических, так и в лингвистических аспектах, которые отражены в Национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р57767–2017 «Субтитры к кино- и видеопродукции для инвалидов по слуху. Общие технические требования по информационной доступности» [2]. Обычные субтитры, которые дублируют реплики персонажей, не подходят для людей с нарушением слухового аппарата. Для них нужны специальные субтитры, отражающие звуки окружающих действий. Например, когда главные герои фильма слышат стук в дверь или треск пламени, на экране появятся субтитры: (стук в дверь, треск пламени). Помимо важных технических характеристик (количество строк, количество знаков в строке, продолжительность показа субтитров, учет скорости чтения субтитров, вида шрифта, цвета текста и т. д.), стандарт прописывает и необходимость учета паралингвистической и экстралингвистической информации из видео (субтитры должны передавать не только речь, но и звуки из видео; звуки и особенности речи должны сопровождаться соответствующими ремарками). Таким образом, субтитры для глухих и слабослышащих можно рассматривать как отдельный вид субтитров, генерация которых должна производиться с учетом вышеперечисленных особенностей. В зарубежных источниках данный вид субтитров обозначается как субтитры SDH [3].

Дополнительная экстралингвистическая и паралингвистическая информация, которую необходимо отражать в субтитрах, может быть заключена в музыке (её настроении, громкости и пр.), звуках природы (дождь, гром и т. д.), звуках животных, звуках, важных для понимания контекста (звон колоколов, стук в дверь и т. п.), интонации (вопрос, восклицание) и эмоциональной окраске речи (страх, гнев, радость и пр.). В настоящее время доступные сервисы для преобразования видео или аудио в текст не предоставляют таких возможностей. Таким образом, целью данного проекта является разработка системы для генерации SDH-субтитров для людей с нарушением слуха из видео, отвечающих

требованиям стандарта и учитывающих экстралингвистическую и паралингвистическую информацию. Но для того, чтобы начать писать код, необходимо обратиться к нормам по созданию субтитров для людей с нарушением слухового аппарата. На сегодняшний день существуют два документа, в которых прописано, как нужно составлять субтитры для слабослышащих людей в России: приказ Минкультуры России №1457 от 29.08.2017 «Об утверждении Требований к субтитрованию и тифлокомментированию полнометражных национальных фильмов, создаваемых в художественной или анимационной форме», национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57767–2017 «Субтитры в кино- и видеопродукции для инвалидов по слуху. Общие технические требования по информационной доступности» [2]. Рассмотрим два метода, предложенных в качестве решения данной проблемы.

Метод одномерных моделей

Этот метод основан на свёрточной нейронной сети, структура свёрточной нейронной сети показана на рис. 1. В свёрточной нейронной сети операции свёртки используется лишь ограниченная матрица весов небольшого размера, которую «двигают» по всему обрабатываемому слою (в самом начале – непосредственно по входному изображению), формируя после каждого сдвига сигнал активации для нейрона следующего слоя с аналогичной позицией. То есть для различных нейронов выходного слоя используется одна и та же матрица весов, которую также называют *ядром свёртки*. Её интерпретируют как графическое кодирование какого-либо признака, например, наличие наклонной линии под определённым углом. Тогда следующий слой, получившийся в результате операции свёртки такой матрицей весов, показывает наличие данного признака в обрабатываемом слое и её координаты, формируя так называемую карту признаков.

При таком подходе мы подгоняем каждый кадр к CNN (свёрточная нейронная сеть) индивидуально. Небольшая нейронная сеть преобразует все выходные данные в верхней части операции объединения, например максимум, сумму или среднее значение, чтобы получить один вектор признаков для всего видео. К данной относительно простой модели можно повторно использовать CNN, предварительно обученную для изображений, и обрабатывать все кадры параллельно. Однако ограничением этого подхода является то, что эти операции объединения не знают временного порядка. Эта стратегия обычно применяется для коротких видеоклипов с одним главным событием, исполняемым от начала до конца [4].

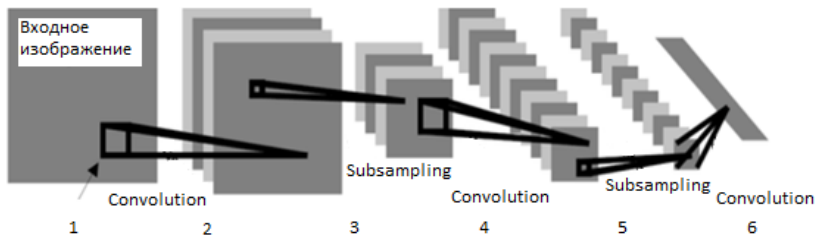


Рис. 1. Структура сверточной нейронной сети: 1 – ядро свёртки, 2 – свёртка – проход ядром свёртки по всем нейронам нижнего слоя для активации нейронов верхнего слоя, далее формируются карты признаков, 3 – подвыборка – операция уменьшения размерности, 4 – свёртка, 5 – подвыборка, 6 – свёртка

Сверточные нейронные сети с рекуррентными нейронными сетями

Этот метод основан на совмещении сверточной нейронной сети и рекуррентной сети. Рекуррентная нейронная сеть работает следующим образом: она подает свои выходные данные обратно на свои собственные входы, как показано на рис. 2.

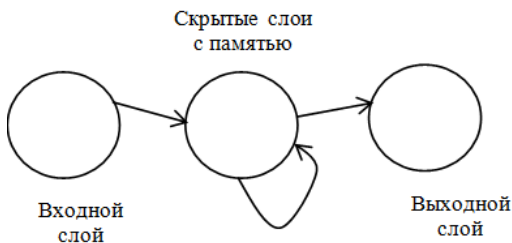


Рис. 2. Структура рекуррентной нейронной сети

Таким образом, уровни активации сети образуют динамическую систему, которая может достигать устойчивого состояния, переходить в колебательный режим или даже проявлять хаотичное поведение. Более того, отклик сети на конкретные входные данные зависит от ее начального состояния, которое, в свою очередь, может зависеть от предыдущих входных данных. Это свойство позволяет рекуррентным нейронным сетям (в отличие от сетей с прямым распространением) моделировать кратковременную память. В данном методе мы попытаемся использовать лучшее из обоих методов, включая уровень RNN (рекуррентная нейронная сеть) для объединения отдельных представле-

ний CNN вместо операции объединения. В конце входной последовательности модель изучает представление, кодируя всю информацию о последовательности. Также нельзя забывать о временной эволюции сигнала, а именно о его изменении, вследствие чего нам придется сделать столько же последовательных шагов, сколько кадров в видео. Этот подход является частью так называемой стратегии динамического кодирования.

Также нужно учесть еще один аспект видеформата, когда мы пытаемся обработать последовательность кадров видео – это возникновение пауз между сценами. Визуальная и смысловая информация в одном видеосегменте может сильно отличаться от таковой в соседних сегментах. С помощью RNN мы пытаемся научиться объединять эту информацию. Однако можно пойти дальше и включить явную информацию о том, когда эти изменения происходят на видео. Этот шаг известен как обнаружение границ и был включен в определение визуальных представлений как частный случай иерархических рекуррентных сетевых кодировщиков [4]. Однако данные сети не смогут должным образом распознавать и выдавать субтитры для людей со слабым слуховым аппаратом. Восприятие слабослышащих людей сильно отличается от здорового человека, для них нужно прописывать в субтитрах, например, события, такие как: свист ветра, гром, идущий после удара молнии, или скрип двери. Для решения данной проблемы предлагаю подключить к нейронным сетям библиотеку по распознаванию аудиофайлов и выводу субтитров на экран. Можно использовать такие библиотеки, как `librispeech` или `speech_recognition`, но их необходимо доработать, чтобы они смогли распознавать не только речь, но и окружающую среду, эффекты окружения, тональность речи персонажа и вывести все это на экран.


Вывод

Проанализировав доступные источники, мы пришли к следующим выводам. В настоящее время существует множество способов вывода субтитров на видео. В данном докладе рассмотрены два метода: одномерные модели с использованием сверхточных нейронных сетей и сверхточные нейронные сети с рекуррентными нейронными сетями. Используя эти методы, для лучшего восприятия видео слабослышащими людьми предлагается преобразование голоса в субтитры с учётом паралингвистической и экстралингвистической информации, к некоторым фразам или действиям добавлять приписку о том, в каком тоне произнес актер эту реплику и т. д. Например: актёр произнёс фразу: «Я рад, что все хорошо» с припиской «радостно». Данные приписки

помогут людям со слабым слуховым аппаратом лучше понять, что происходит на видео.

Список использованных источников и литературы

1. Федеральный закон от 30.10.2018 № 380-ФЗ «О внесении изменений в статью 31 Закона Российской Федерации «О средствах массовой информации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001-201810310017> (дата обращения: 18.06.2023).
2. ГОСТ Р 57767–2017. Субтитры к кино- и видеопродукции для инвалидов по слуху. Общие технические требования по информационной доступности. – URL: https://allgosts.ru/11/180/gost_r_57767-2017 (дата обращения: 18.06.2023).
3. *Neves, J.* Interlingual Subtitling for the Deaf and Hard-of-Hearing // *Audiovisual Translation: Language Transfer on Screen* / ed. by J. D. Cintas, G. Anderman. PalgraveMacmillan. – 2009. – Pp. 151-169.
4. Форум для обзора проблемы преобразования видео в текст «arxiv». – URL: <https://arxiv.org/abs/2103.14785> (дата обращения: 15.11.2023).
5. *Буркин, О. М.* Применение нейронных сетей // *Теоретические и практические аспекты научных исследований.* – 2019. – С. 54–57.
6. *Вьюгин, В.В.* Математические основы машинного обучения и прогнозирования. – Москва : Московский центр непрерывного математического образования. – 2013, 2018. – 484 с.
7. *Barber, D.* Bayesian Reasoning and Machine Learning. – 1-st ed. – Cambridge University Press, 2012. – 735 p.
8. *Nils, J. N.* Introduction to machine learning. – Stanford University, 1998. – 188 p.
9. *Trevor, H.* The Elements of Statistical Learning. Data mining, Inference and Prediction / H. Trevor, R. Tibshirani, J. Friedman // *Shi jie tu shu chu ban gong si.* – 2023. – 745 p.
10. *Michie, D.* Machine Learning, Neural and Statistical Classification // Overseas Press. – 1994. – 289 p.
11. *Rashid, Tariq.* Make Your Own Neural Network // CreateSpace Independent Publishing Platform. – 2016. – 222 p.
12. *Russell, S. J.* Artificial Intelligence A Modern Approach / S. J. Russell, P. Norvig, E. Davis. – Prentice Hall, 2010. – 1132 p.
13. *Abu-Mostafa, Y. S.* Learning From Data / Y. S. Abu-Mostafa, M. Magdon-Ismail, H. Lin. – AMLBook.com, 2012. – 201 p.
14. *Флах, П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных // ЛитРес. – 2022. – 400 с.

I. D. Litvinov , master student
M. A. Al Akkad, CSc in engineering, associate professor
E-mail: ilvin.litvinov@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Practical Application of Subtitles in Videos for People with Hearing Impairment

This paper explores the practical application of subtitles in videos for people with hearing impairment. The use of subtitles in videos for people with hearing impairment is one of the most pressing issue our society, therefore effective algorithms are being created to solve this problem, which is an important research area. This work provides an overview of ways to implement subtitles in videos for people with hearing impairment. Two methods were proposed as a solution to this problem, one-dimensional convolutional neural network models, and ultra-precise neural networks with recurrent neural networks, in order to enable better video perception for people with hearing impairment. The voice will be converted into subtitles, taking into account the paralinguistic and extra-linguistic information, where a postscript will be added to some phrases or sounds in the environment.

Keywords: hearing impairment, convolutional neural networks, recurrent networks, voice to subtitles conversion, paralinguistic and extra-linguistic information.

УДК 004.738.2

А. А. Лысов [✉], магистрант

Д. С. Васильев, канд. техн. наук, доц.

E-mail: kuzija.lysov@yandex.ru

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

Обзор существующих решений в области IVCAD-систем

В статье описаны методы реализации системы беспилотного городского транспорта с применением беспроводных систем связи автотранспорта и придорожной инфраструктуры. Приведена классификация каждого метода и их недостатки. Представлены способы их устранения, а также перспективы развития данной сферы.

Ключевые слова: беспилотный транспорт, системы связи, интернет вещей, умный город.

Введение

В связи с развитием информационных технологий все большее значение им отдается в сфере транспорта. И если беспилотные летательные аппараты себя крайне хорошо зарекомендовали, то что насчет наземного транспорта?

Основная особенность автомобильного автопилота, в отличие от воздушного, заключается в том, что наземному необходимо преодолевать препятствия (другие участники движения, дорога и иные объекты), что вносит требования к скорости и своевременности реагирования на изменения ситуации [1].

Для этих целей разрабатываются системы IVCAD (Infrastructure-Vehicle Cooperative Autonomous Driving – совместного управления автономной транспортной инфраструктуры), которые представляют собой систему обмена информацией о событиях на дороге, между беспилотными автомобилями и RSU (рисунок). RSU (Road Side Unit) – придорожные телекоммуникационные элементы, которые анализируют ситуацию на дороге с помощью камер и/или каких-либо датчиков, передают на другие RSU и беспилотные автомобили, а также обеспечивают функционирование всей сети IVCAD. Сеть может быть реализована как Mesh, Ad hoc, MANET [2].

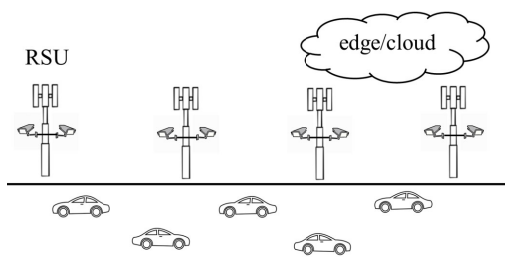


Иллюстрация IVCAD системы

Классификация систем

Существуют три основных типа IVCAD (таблица):

1) Sensing extension – продвинутое восприятие: RSU используется только для расширения мониторинговых функций беспилотных транспортных средств в критических местах, где видимость может быть ограничена. При этом беспилотные автомобили могут двигаться самостоятельно, без полной зависимости от придорожной инфраструктуры.

2) Roadside sensing – придорожное восприятие: транспортные средства имеют ограниченные средства восприятия и зависят от RSU для сбора данных о дорожной обстановке. Однако принятие решений о вождении в основном осуществляется самими автомобилями.

3) Roadside control – придорожное управление: автономные транспортные средства имеют ограниченные средства восприятия и обработки информации и полностью зависят от придорожной инфраструктуры как для сбора данных, так и для принятия решений. В этом случае транспортные средства выполняют только инструкции по вождению, предоставляемые придорожной инфраструктурой [2, 3].

Сравнение типов IVCAD

Тип	Восприятие	Принятие решений	Нагрузка на сеть	Тип данных
Продвинутое восприятие	На борту, с помощью RSU	На борту	Низкая	Сенсорные данные
Придорожное восприятие	На RSU, с помощью борта	На борту	Низкая	Сенсорные данные
Придорожное управление	На RSU	На RSU	Высокая	Сенсорные данные, управление


Реальная система IVCAD может включать в себя черты нескольких типов в зависимости от конкретных потребностей и задач.

Заключение

Если разворачивать RSU только на опасных/загруженных участках дороги или на большом удалении, то можно ограничиться существующими сетевыми технологиями и стандартами, например, 802.11р. Но если необходимо разворачивать RSU более плотно и зона развертывания достигает масштаба города, с тысячами и даже миллионами пользователей IVCAD (RSU и транспортные средства), то затраты на развертывание и обслуживание сети будут крайне высоки [4].

Список использованных источников и литературы

1. MSight: An Edge-Cloud Infrastructure-based Perception System for Connected Automated Vehicles / R. Zhang, D. Meng, S. Shen, Z. Zou, H. Li, H.X. Liu // arXiv preprint arXiv:2310.05290. – 2023. – 13 p. – DOI: 10.48550/arXiv.2310.05290.
2. On scalable network communication for infrastructure-vehicle collaborative autonomous driving / S. Yang, H. H. Yin, R. W. Yeung, X. Xiong, Y. Huang, L. Ma, M. Li, C. Tang // IEEE Open Journal of Vehicular Technology. – 2022. – Pp. 1-14. – DOI: 10.1109/OJVT.2022.3226606.
3. A review on cooperative perception and control supported infrastructure-vehicle system / Guizhen Yu, Han Li, Yunpeng Wang, Peng Chen, Bin Zhou // Green Energy and Intelligent Transportation. – 2022. – Vol. 1, issue 3. – P. 100023. – DOI: 10.1016/j.geits.2022.100023.
4. Invited: Towards Fully Intelligent Transportation through Infrastructure-Vehicle Cooperative Autonomous Driving: Challenges and Opportunities / S. Liu, B. Yu, J. Tang, Q. Zhu // 58th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC). – 2021. – Pp. 1323-1326. – DOI: 10.1109/DAC18074.2021.9586317.

A. A. Lysov , master student

D. S. Vasil'ev, CSc in engineering, associate professor

E-mail: kuzija.lysov@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Overview of Existing Solutions in the Field of IVCAD Systems

The article describes the methods of implementing an unmanned urban transport system using wireless communication systems for vehicles and roadside infrastructure. The classification of each method and their disadvantages are given. The ways to eliminate them are presented, as well as the prospects for the development of this area.

Keywords: unmanned transport, communication systems, Internet of things, smart city.

УДК 374.773.7

Г. С. Пестерев ^{✉ a}, студент

И. В. Загуляев, студент

Е. В. Кортаева, студент

М. З. Ахметзянов, ст. преподаватель

Е. М. Зайцева ^{✉ b}, канд. пед. наук, доц.

E-mail: ^agrishap2018@mail.ru, ^bEM_ZAYTSEVA@YANHO.COM@mail.ru

Ижевский государственный технический университет

имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Разработка и создание устройства для подсчёта количества отжиманий

В статье представлена разработка устройства для автоматического подсчёта отжиманий. Создание программной части велось в среде разработки Arduino IDE. Использовалась плата Arduino Nano с микроконтроллером ATmega328P, ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04 и жидкокристаллический дисплей.

Ключевые слова: Arduino Nano, Arduino IDE, ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04, жидкокристаллический дисплей.

Введение

Целью проекта, рассмотренного в статье, является создание устройства для автоматического подсчёта отжиманий. Такое устройство исключит человеческий фактор при подсчёте и при оценке качества отжиманий.

В настоящее время при сдаче норм ГТО [1] и на других спортивных мероприятиях для подсчёта количества отжиманий используется специальная контактная платформа (рис. 1, 2). Она имеет основание, контактную плоскость, контактный валик, микропереключатель, счетчик и пружину. В таком устройстве для фиксации отжиманий происходит надавливание грудью на контактный валик, при этом контактная плоскость устройства движется вниз к его основанию и касается контакта микропереключателя, после этого происходит световая или звуковая индикация и отжимание считается выполненным [3].

Такое устройство обеспечивает учёт сгибания локтей, не учитывая при этом морфологические особенности конкретного организма.



Рис. 1. Платформа для отжиманий в домашних условиях



Рис. 2. Платформа для отжиманий, используемая при сдаче норм ГТО

Постановка задачи

Устройство для подсчёта отжиманий должно определять индивидуальные расстояния полного сгибания и разгибания локтей для каждого человека, которые ему необходимо достигать для правильного выполнения отжимания. Устройство должно вести счёт правильно выполненным упражнениям и производить световую индикацию их количества перед участником, а результат отправлять по USB-кабелю на компьютер.

Требования к прибору:

- небольшие габариты и небольшая масса;
- минимальные погрешности в оценке качества отжиманий;
- дешевизна составляющих компонентов и изготовления устройства.

Решение задачи

Устройство разработано на плате Arduino Nano, которая имеет относительно невысокую стоимость, проста в использовании и программировании, а также обладает необходимой функциональностью [2].

Для измерения расстояния от устройства до груди человека было решено использовать ультразвуковой датчик расстояния HC-SR04. Он подключается к Arduino Nano и посылает на нее данные о времени излучения ультразвука источником и о времени, когда этот ультразвук, отразившись от препятствия, был принят приемником. Зная скорость распространения ультразвука, по формуле $S = V \cdot t$ можно рассчитать нужное расстояние. Эти вычисления производит микроконтроллер ATmega328, установленный на плате Arduino Nano.

Технические характеристики Arduino Nano:

- микроконтроллер: ATmega328;
- напряжение питания 3–15 В;
- флеш-память 16 Кб или 32 Кб в зависимости от чипа;
- ОЗУ 1 Кб или 2 Кб в зависимости от чипа;
- частота 16 МГц;
- размеры 19 x 42 мм.

Характеристики ультразвукового датчика HC-SR04:

- напряжение питания: +5В;
- эффективный рабочий угол: $< 15^\circ$;
- расстояние измерений: от 2 см до 400 см;
- разрешающая способность: 0.3 см;
- угол измерений: 30 градусов;
- ширина импульса триггера: 10 микросекунд;
- размеры: 45 мм x 20 мм x 15 мм.

Для написания кода применялась среда разработки Arduino IDE и язык программирования Arduino C. Использовалась библиотека `iarduino_HC_SR04`, которая обеспечивает определение программой расстояния от датчика HC-SR04 до объекта.

Корпус для устройства подсчета отжиманий (рис. 3) был напечатан на 3D-принтере, имеет удобную конструкцию, а также приятный вид и красивый цвет.

На рис. 4 представлено собранное готовое устройство.

Результаты разработки

Устройство для подсчета количества отжиманий определяет необходимое нижнее и верхнее положение тела для конкретного человека, которые ему необходимо достигать для правильного выполнения отжимания. Также оно считает количество правильно выполненных упрagne-

ний, а результат показывает участнику на жидкокристаллическом дисплее и отправляет его по USB-кабелю на компьютер. Диапазон корректной работы данного устройства от 2 сантиметров до 4 метров, такая точность достаточна для решения поставленной задачи. Внешний шум и вибрация на работу устройства никак не влияют. Благодаря световой индикации участник знает, сколько раз он выполнил отжимание правильно, что является для него хорошим стимулом в процессе работы.

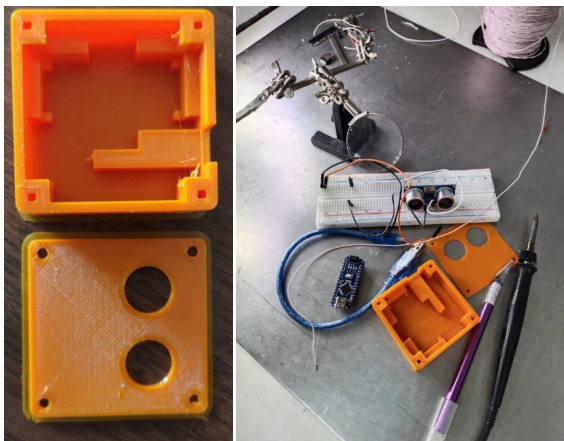


Рис. 3. Корпус устройства для подсчёта количества отжиманий

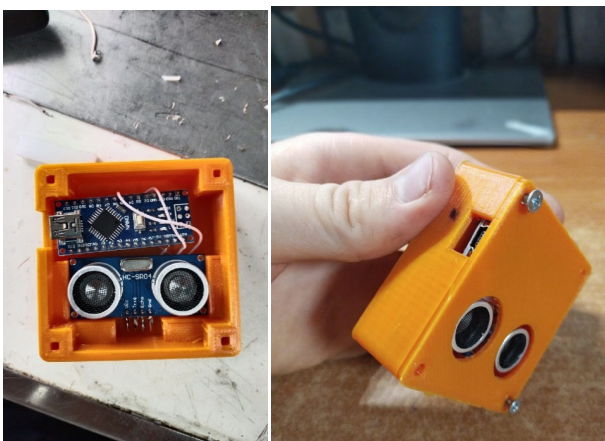


Рис. 4. Устройство для подсчета количества отжиманий

Вывод

Было создано устройство для автоматического подсчёта отжиманий со всеми требуемыми характеристиками. Данное устройство можно усовершенствовать, добавив в него модуль Wi-Fi или Bluetooth. В таком случае один судья сможет сразу оценивать результаты большой группы участников и не будет необходимости протягивать кабель между передающими и принимающими устройствами. Также вместо ультразвукового датчика можно использовать лазерный датчик, что повысит точность оценки отжимания.

Список использованных источников и литературы

1. Комплекс ГТО – отжимание // TRAMPLINSPORT.RU, Россия : сайт. – URL: <https://traplinsport.ru/info/kompleks-gto-otzhimanie> (дата обращения: 14.10.2023).
2. Блум, Дж. Изучаем Arduino . – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2020. – 540 с. – ISBN 978-5-9775-6736-7.
3. Патент №170016 Рос. Федерация : МПК А63В 21/00 (2017.04). Устройство для контроля отжиманий от пола в положении упора лёжа / Гаткин Е. Я. и др. – Заявка № 2016116207/17 от 11.04.2017. – Опубл. 11.04.2017.

G. S. Pesterev ^{✉ a}, student

I. V. Zagulyaev, student

E. V. Korotaeva, student

M. Z. Akhmetzyanov, senior lecturer

E. M. Zaitseva ^{✉ b}, CSc in pedagogy, associate professor

E-mail: ^a grishap2018@mail.ru, ^b EM_ZAYTSEVA@YAHOO.COM@mail.ru


Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Development and Creation of a Push-Up Counter in the Arduino Environment

This article presents the experience of developing an ultrasonic sensor in the Arduino environment for automatically counting correctly performed push-ups in a prone position for practical use in physical education lessons and during sporting events. The testing results of this device showed its accuracy and ease of use relative to existing analogues.

Keywords: Arduino Nano, Arduino IDE, Ultrasonic Distance Sensor HC-SR04.

УДК 621.377.037.3

М. Н. Пушкарева , магистрант

К. С. Адуллин, магистрант

E-mail: MariaPushkareva13@yandex.ru

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

Разработка программно-аппаратного блока управления аттенюаторами

В статье рассмотрен процесс модификации и разработки программно-аппаратного блока управления аттенюаторами, предназначенный для преобразования цифровой информации, поступающей на его входы, в управляющие токи рпн-аттенюаторов входных устройств приемных систем. Модернизация блока направлена на повышение технических и эксплуатационных характеристик и на улучшение материальных затрат, потраченной энергии. Проведен анализ необходимости модернизации действующего блока, на его основе разработана функциональная схема блока, включающего модернизацию, определены его функции, обоснован выбор элементной базы для выполнения данной модернизации. Оценено быстрдействие блока, включающего модернизацию, в сравнении с действующим блоком.

Ключевые слова: блок управления аттенюаторами, модернизация, вычислительная система, программируемая логическая интегральная схема, схема функциональная, панель.

Введение

Модернизация различных систем, не только гражданской, но и военной техники, является актуальной проблемой. Это обусловлено тем, что любая техника имеет особенность устаревать со временем, иными словами, теряет способность удовлетворять требованиям потребителей. В частности, по достоверности передаваемой информации в условиях помех и длинных линиях связи между блоками. В статье рассматриваются вопросы в процессе разработки и пути их решения при модернизации блока.

Постановка задачи

Целью рассматриваемой работы является модернизация блока, направленная на повышение технических и эксплуатационных характери-

стик и на улучшение материальных затрат, потраченной энергии, обеспечение гибкого управления параметрами блока и перевода обмена между вычислительной системой и новым блоком на протокол по ГОСТ Р 52070-2003 [1] (Манчестер 2 – вид кодирования сигнала на физическом уровне).

Для достижения цели, требовалось решить следующие задачи [2–5]:

- провести анализ действующего блока управления рпн-аттенуаторами;
- выбор элементной базы для выполнения данной модернизации;
- описать конструктив блока;
- разработка функциональной схемы модернизированного блока управления рпн-аттенуаторами;
- оценить быстроедействие модернизированного блока.

Анализ действующего блока управления рпн-аттенуаторами

Блок управления рпн-аттенуаторами (БУА) предназначен для преобразования входных пятиразрядных двоичных кодов в постоянный ток управления рпн-аттенуаторами входных устройств приемных систем. Блок представляет собой 18-канальный преобразователь код – ток.

Коды поступают из приемной вычислительной системы по числовой магистрали в зависимости от режима работы.

Преобразование входных сигналов из цифровой формы в аналоговую производится преобразователем код – напряжение (ПКН), с выхода которого аналогичные напряжения поступают на входы усилителей тока. Переключение входных сигналов от приемной и вычислительной систем на входах ПКН осуществляется с помощью трех различных типов коммутирующих устройств. Для питания предусмотрены семь источников вторичного электропитания трех номиналов выходного напряжения.

На рис. 1 представлена схема функциональная БУА до модернизации.

Анализ необходимости модернизации БУА

При рассмотрении действующего БУА были выявлены следующие недостатки:

- большое количество типов панелей – 17;
- большое количество панелей – 34;
- большое энергопотребление по цепи плюс 5 В – до 15 А;
- блок работает по жесткой логике;
- сложная корректировка функциональности работы блока;
- не гибкая информационная система обмена связи с ВС.

Учитывая все перечисленные недостатки БУА, необходимо его модернизировать. Модернизированный блок также предназначен для пре-

образования входных пятиразрядных двоичных кодов в постоянный ток управления рпн-аттенуаторами входных устройств приемных систем. Новый блок должен быть свободен от недостатков, присущих устройствам, использующим числовые магистрали.

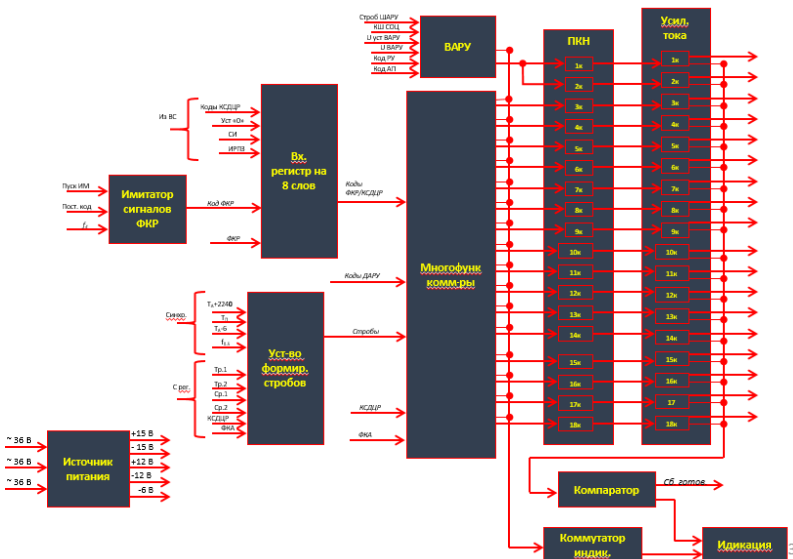


Рис. 1. Функциональная схема БУА до модернизации

Модернизированный БУА должен выполнять следующие функции:

- обеспечивать взаимодействие с вычислительной системой (ВС) по ГОСТ Р 52070–2003 интерфейс магистральный последовательный;
- осуществлять обработку цифровых данных аналогично исходному блоку;
- уменьшение блока потребления по цепи плюс 5 В;
- исключить из блока все цифровые панели, реализованные на устаревшей элементной базе;
- иметь габариты такие же, как у исходного блока;
- иметь полное функциональное соответствие БУА до модернизации.

Для реализации функций исключаемых цифровых панелей используем ПЛИС и микроконтроллер для связи с ВС по протоколу Манчестер 2.

Разработка функциональной схемы БУА после модернизации

На основе рассмотренной выше функциональной схемы для решения поставленной цели разработана схема, включающая модернизацию, которая представлена на рис. 2.

На вход блока, как и в действующем блоке, управляющие коды из приемной системы поступают через преобразователь уровня ТТЛ (транзисторно-транзисторная логика) в 3,3 В. От ВС двоичные коды поступают по протоколу Манчестер 2 через микроконтроллер (МК). Программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) в системе реализует весь комплект коммутационных блоков, к которым относятся временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ), регистр и многофункциональный коммутатор. Для питания микроконтроллера и ПЛИС предусмотрен источник питания 3,3 В. Для программирования МК и ПЛИС предусмотрены JTAG (Joint Test Action Group) и постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). Панели ПКН, усилители тока, компараторы и источники питания на 12, 15 и 6 В останутся прежними.

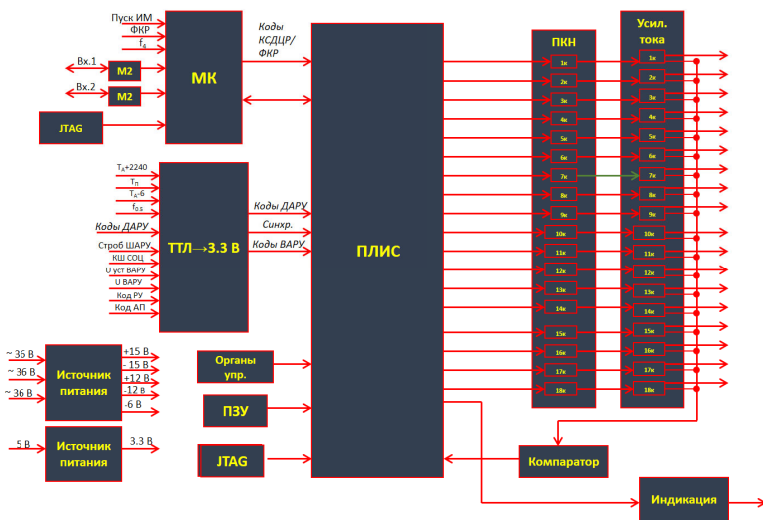


Рис. 2. Функциональная схема БУА после модернизации

Конструкция блока управления рin-аттенюаторами

Конструктивно действующий блок выполнен в виде стандартного блока второго габарита, как показано на рис. 3.

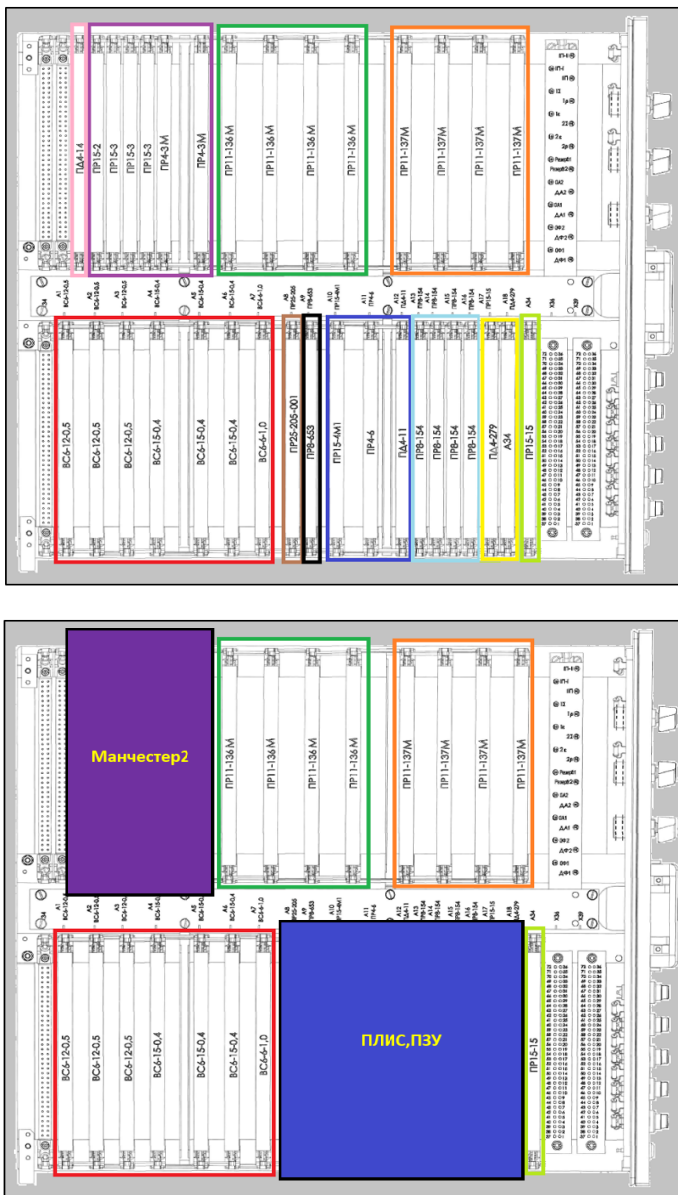


Рис. 3. Конструкция БУА до и после модернизации

В состав входят 33 панели. Данные панели расположены на шасси в два ряда и объединены коммутационной печатной платой (КПП). Соответствие панелей блокам функциональной схемы представлено на рис. 3. При модернизации из конструктива будут удалены панели коммутации с верхнего ряда и панель ВАРУ, панели индикации, устройство формирования стробов, имитатор сигналов и регистр слов с нижнего ряда. На освободившееся на КПП место установятся элементы интерфейса Манчестер 2, а также ПЛИС с ПЗУ соответственно. Источник питания на 3,3 В организуется на одной микросхеме стабилизатора. Панели ПКН, усилители тока, компараторы и источники питания останутся на прежнем месте.

Выбор элементной базы

В качестве ПЛИС выбрана модель 5576XC1T. К достоинствам данной микросхемы относится: питание 3,3 В, что позволяет подключить ее к одному источнику питания с микроконтроллером, 5-вольтовая толерантность, что позволит организовать связь с панелью компараторов без схемы согласования уровней, а также возможность многократной конфигурации. Однако количество пользовательских выводов всего 176, чего недостаточно для организации всей системы коммутации, согласно функциональной схеме, которая имеет 321 вывод. Поэтому необходимо организовать систему из двух ПЛИС.

Перевод информационного обмена между ВС и блоком на протокол Манчестер 2 в схеме реализован на микроконтроллере 1986BE1T. К главным достоинствам данного микроконтроллера можно отнести наличие двух независимых каналов приема/передачи сообщений, высокое быстродействие и простоту отладки.

Результаты

Для оценки быстродействия необходимо сравнить задержки в тех микросхемах, которые более влиятельны при работе всей системы. В БУА до модернизации участвуют панель коммутации и панель ВАРУ. В панели коммутации сигнал с внешних блоков на панель ПКН поступает через две микросхемы 133ЛА3, которые в сумме имеют задержку 44 нс, в панели ВАРУ самая большая задержка была выявлена в цепи счетчик – ПЗУ и равняется 92 нс. В БУА после модернизации задержку определяет система преобразователь уровня – ПЛИС, которая в сумме имеет задержку 40нс.

Выводы

В ходе выполнения работы на основе функциональной схемы исходного блока разработана функциональная схема модернизированного

блока, произведен выбор элементной базы под организацию описанной модернизации, оценено быстродействие модернизированного блока в сравнении с исходным, организована гибкая информационная система связи блока, снижено энергопотребление по цепи плюс 5 В, материальные затраты на блок, оптимизирована корректировка функциональности работы блока.

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ Р 52070–2003. Интерфейс магистральный последовательный системы электронных модулей. Общие требования. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/59/5922.pdf?ysclid=lyvr91ts83715055069> (дата обращения: 08.08.2024).
2. Харрис, Д. М. X21 Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Д. М. Харрис, С. Л. Харрис. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 792 с.
3. Наваби, З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС / пер. с англ. Соловьева В. В. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 464 с.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – Изд. 6-е. – Москва : Мир, 2003. – 704 с.
5. Цифровой синтез: практический курс / под общ. ред. А. Ю. Романова, Ю. В. Панчула. – Москва : ДМК Пресс. – 2020. – 556 с.

M. N. Pushkareva ✉, master student

K. S. Adullin, master student

E-mail: PushkarevaMaria13@yandex.ru


Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Development of a Software and Hardware Control Unit for Attenuators

The article discusses the process of modification and development of a hardware-software attenuator control unit, designed to convert digital information received at its inputs into control currents of pin-attenuators of input devices of receiving systems. Modernization of the unit is aimed at improving technical and operational characteristics and improving material costs and energy consumed. An analysis of the need to modernize the existing unit was carried out and, on its basis, a functional diagram of the unit including modernization was developed, its functions were determined, and the choice of the element base for performing this modernization was justified. The performance of the unit, including modernization, was assessed in comparison with the existing unit.

Keywords: attenuator control unit, modernization, computer system, Field Programmable Gate Array, functional circuit, panel.

УДК 621.396.62

Чан Хью Нгхи , аспирант

E-mail: huunghiht@gmail.com

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

Исследование влияния скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на эффективность алгоритма распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах

В статье рассматриваются результаты моделирования процесса обработки ЛЧМ-сигналов в алгоритме распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах. Результаты моделирования позволили оценить влияние скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на вероятность правильного распознавания в зависимости от входного отношения сигнал-шум.

Ключевые слова: средства радиомониторинга, распознавание сигналов, вероятность правильного распознавания, ЛЧМ-сигнал, скорость изменения частоты.

Введение

В современных радиолокационных и радионавигационных системах широко используются сложные сигналы [1–4]. Для получения радиолокационных изображений поверхности планеты и находящихся на ней объектов в радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны широко используются сложные сигналы, в частности сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). В средствах радиомониторинга параметры ЛЧМ-сигналов заранее неизвестны, поэтому требуются специальные алгоритмы их приема и обработки [5–8]. В условиях априорной неопределенности параметров ЛЧМ-сигналов одним из методов их обработки является использование алгоритма распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах [9, 10]. Алгоритм, основанный на обработке сигнала на двух ненулевых промежуточных частотах, одна из которых удвоенная, позволяет распознавать немодулированные радиоимпульсы (НМРИ), ЛЧМ-сигналы с убывающим законом изменения частоты (ЛЧМ–) и возрастающим законом изменения частоты (ЛЧМ+), а также сигналы с двоичной (ДФМ) и квадратурной (КФМ) фазовой манипуляцией.

Сравнение вероятности правильного распознавания данных сигналов в зависимости от отношения сигнал-шум (ОСШ) выполнено в [10]. Однако не было исследовано влияние скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на данную зависимость при приеме ЛЧМ-сигналов. Это не позволяет полностью оценить эффективность работы алгоритма.

Цель работы – исследование влияния скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на зависимость вероятности его правильного распознавания от ОСШ в алгоритме распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах.

Описание алгоритма

Структурная схема алгоритма [9, 10] распознавания сигналов разных типов представлена на рис. 1, в состав схемы входят следующие функциональные блоки: блок разбиения сигнала (БРС); блок оконного взвешивания (БОВ); блок быстрого преобразования Фурье (БПФ); блок определения несущей частоты (БОНЧ); блок частотного анализа (БЧА); линия задержки (ЛЗ); генератор (Г); преобразователь частоты (ПЧ); блок удвоения частоты (БУЧ); полосовые фильтры ПФ1 и ПФ2; детекторы огибающей ДО1 и ДО2; блок принятия решений (БПР).

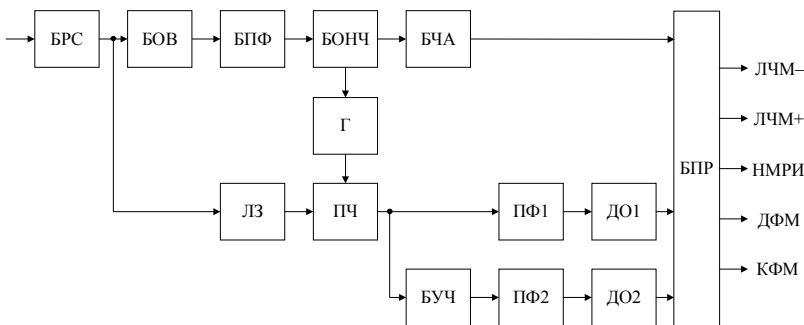


Рис. 1. Структурная схема алгоритма распознавания сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах

Принцип действия алгоритма заключается в линейной аппроксимации методом наименьших квадратов значений центральной частоты спектров сегмента принятого сигнала в окнах обработки в БЧА и обработке огибающих на промежуточной и удвоенной промежуточной частотах в ДО1 и ДО2. Распознавание сигнала осуществляется после обнаружения наличия сигнала на фоне аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в частотной области в БОНЧ. Для распознавания сигнала

лов разного типа используются следующие параметры: коэффициент наклона аппроксимированной прямой a , ее дисперсия σ^2 , провалы огибающих на промежуточной $K1$ и удвоенной промежуточной частотах $K2$. По результатам сравнения вышеперечисленных параметров с заданными пороговыми значениями БПР принимает решение о типе принятого сигнала. Для распознавания ЛЧМ-сигналов используются коэффициент a и дисперсия σ^2 . Значения a и σ^2 рассчитываются при линейной аппроксимации значений центральной частоты спектра сегмента принятого сигнала f_i по времени t_i в окнах обработки n методом наименьших квадратов по формулам (1) и (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i f_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n f_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n f_i \right)^2}, \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n f_i - a \sum_{i=1}^n t_i}{n} \end{array} \right. , \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - (at_i + b))^2. \quad (2)$$

Более подробно принцип работы алгоритма описан в [9, 10].

Результат моделирования

Для оценки влияния скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса на вероятность правильного распознавания сигналов данного типа в зависимости от ОСШ проведено моделирование алгоритма, представленного на рис. 1, в среде MATLAB. Так как вероятности правильного распознавания сигналов с ЛЧМ– и ЛЧМ+ существенно не отличаются, в данной работе в качестве ЛЧМ-сигналов исследовался только сигнал с ЛЧМ+ [10].

При моделировании задавались следующие исходные данные.

Для входного ЛЧМ-сигнала: длительность импульса – от 5 до 20 мкс с шагом 0,05 мкс; начальное значение частоты импульса – 10 МГц; девиация импульса – от 5 до 400 МГц; скорость изменения частоты внутри импульса – 1; 10 и 20 МГц/мкс; начальная фаза импульса – случайная. Требуемое входное ОСШ формировалось изменением соответствующего значения амплитуды ЛЧМ-сигнала.

Для алгоритма [9, 10]: частота дискретизации – 1 ГГц; количество окон обработки – 10; число точек БПФ в окне обработки – 1024; вид взвешивающего окна – окно Хэмминга; центральная частота полосовых фильтров ПФ1 и ПФ2 – 50 МГц и 100 МГц соответственно; вероятность ложной тревоги – 10^{-7} .

Результат моделирования со случайно выбранными параметрами из заданных выше диапазонов (по 10^3 измерений для каждого значения ОСШ) представлен на рис. 2.

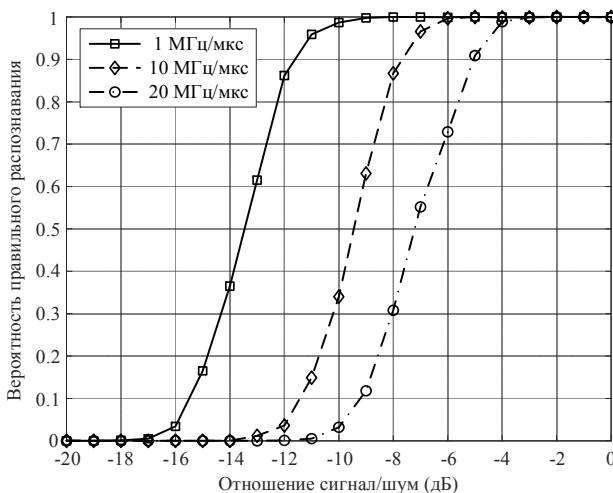


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного распознавания ЛЧМ-сигнала от ОСШ при различных значениях скорости изменения частоты

Выводы

Из полученных результатов следует, что с увеличением скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса от 1 до 20 МГц/мкс графики зависимости вероятности правильного распознавания от ОСШ смещаются вправо. Это связано с тем, что увеличение скорости изменения частоты приводит к расширению ширины спектра сигнала, попавшего в окно обработки. В результате требуется большее значение ОСШ для обнаружения ЛЧМ-сигнала на фоне АБГШ в частотной области. Например, для обеспечения вероятности правильного распознавания, равной 0,9, при уменьшении скорости от 20 до 1 МГц/мкс необходимое ОСШ на входе уменьшается от $-5,1$ до $-11,7$ дБ, а при уменьшении скорости от 20 до 10 МГц/мкс – до $-7,9$ дБ.

Таким образом, требуемое ОСШ на входе алгоритма [9, 10] для заданной вероятности правильного распознавания ЛЧМ-сигналов возрастает по мере увеличения скорости изменения частоты внутри ЛЧМ-импульса.

Список использованных источников и литературы

1. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. Р. Ильчук, А. А. Герасимов. – Москва : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 1112 с.
2. *Купряшкин, И. Ф.* Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением : монография / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев, Л. Б. Рязанцев. – Москва : Радиотехника, 2020. – 288 с.
3. *Купряшкин, И. Ф.* Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех : монография / И. Ф. Купряшкин, В. П. Лихачев. – Воронеж : Науч. книга, 2014. – 460 с.
4. *Ivanov, S.* An elaborated signal model for simultaneous range and vector velocity estimation in FMCW radar / S. Ivanov, V. Kuptsov, V. Badenko, A. Fedotov // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, no. 20. – P. 5860. – DOI: 10.3390/s20205860.
5. *Podstrigaev, A. S.* Selecting a Receiver for Wideband Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems Based on an Assessment of the Signal Environment Complexity / A. S. Podstrigaev, A. V. Smolyakov, V. P. Likhachev, S. E. Efimov, V. V. Davydov // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – Vol. 13158. – Pp. 352–364. – DOI: 10.1007/978-3-030-97777-1_30.
6. *Podstrigaev, A. S.* New Method for Determining the Probability of Signals Overlapping for the Estimation of the Stability of the Radio Monitoring Systems in a Complex Signal Environment / A. S. Podstrigaev, A. V. Smolyakov, V. V. Davydov, N. S. Myazin, N. M. Grebenikova, R. V. Davydov // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2019. – V. 11660. – Pp. 525–533. – DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9_45.
7. *Nhan, N. T.* Study of detection characteristics in recognition of simple radio pulses and signals with lfm and psk in the autocorrelation receiver / N. T. Nhan, A. S. Podstrigaev, V. P. Likhachev, A. A. Veselkov, V. V. Davydov, N. S. Myazin, S. S. Makeev // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2020. – Vol. 12525. – Pp. 415–423. – DOI: 10.1007/978-3-030-65726-0_37.
8. Обоснование требований к вычислительному устройству цифрового автокорреляционного приемника сигналов PCA / В. П. Лихачев, И. Ф. Купряшкин, В. В. Семенов, И. М. Сотников // *Журнал радиоэлектроники*. – 2014. – № 1. – С. 9. – EDN SBPFDH.
9. Пат. 2789386 Рос. Федерация : МПК G01R 23/16 (2006.01). Способ классификации сигналов / Чан Х. Н., Подстригаев А. С., Нгуен Ч. Н. – Заявка № 2022119784 от 19.07.2022. – Оpubл. 02.02.2023. – Бюл. № 4.
10. *Чан, Х. Н.* Алгоритм классификации сигналов с детектированием на двух промежуточных частотах для средств радиотехнического мониторинга / Х. Н. Чан, А. С. Подстригаев, Ч. Н. Нгуен // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2022. – Т. 76, № 7. – С. 30–39. – DOI: 10.18127/j20700784-202207-03.

Tran Huu Nghi [✉], postgraduate student
E-mail: huunghiht@gmail.com
Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg

Investigation of the Influence of the Chirp Rate on the Efficiency of the Signal Recognition Algorithm with Detection at Two Intermediate Frequencies

The paper discusses the results of modeling the process of chirp signal processing in the signal recognition algorithm with detection at two intermediate frequencies. The simulation results allowed us to evaluate the influence of the chirp rate on the probability of correct recognition depending on the input signal-to-noise ratio.

Keywords: RF spectrum management, signal recognition, probability of correct recognition, chirp signal, chirp rate.

УДК 681.586

П. С. Чернов [✉], канд. техн. наук

E-mail: pvllvp@yandex.ru

Пензенский государственный университет, г. Пенза

Концепция работы интеллектуальных датчиков в распределенных информационно-измерительных и управляющих системах

Приведены основные функции интеллектуального датчика и его состав. Предложено использование методов сервис-ориентированной архитектуры для организации работы датчиков в информационно-измерительных и управляющих системах и реализации интеллектуальных функций. Приведены примеры использования и показаны преимущества предлагаемого подхода.

Ключевые слова: интеллектуальный датчик, сервис-ориентированная архитектура, информационное взаимодействие.

Введение

С внедрением информационных и коммуникационных технологий во все сферы жизнедеятельности на протяжении уже многих лет на мировых рынках наблюдается увеличение спроса датчиков. Возрастают и предъявляемые к ним требования. Широкое распространение получают так называемые интеллектуальные датчики (smart sensors) [1]. В зарубежной литературе имеется несколько определений данного термина, наиболее распространенные из которых относятся к одному из следующих типов [2]:

- технологическое: совокупность первичных и вторичных преобразователей, блоков обработки сигнала, контроллеров и пр.;
- функциональное: наличие интеллектуальных функций самоидентификации, самоконтроля, самовосстановления, и др.

В России в настоящее время данный аспект регламентируется государственным стандартом.

Сервис-ориентированное взаимодействие

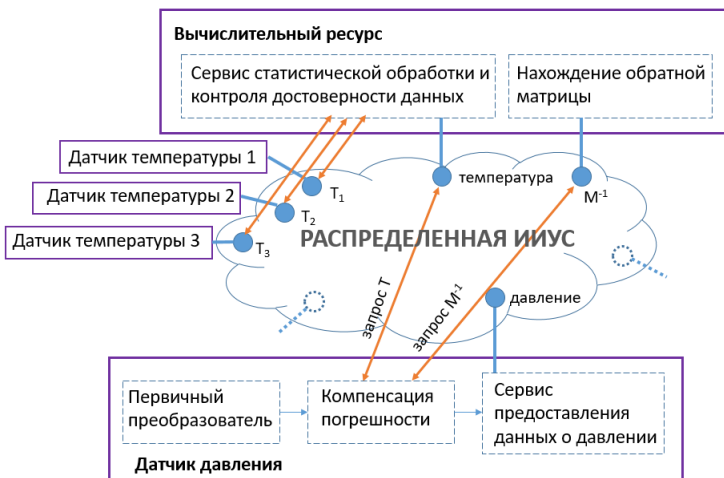
С развитием интернет-технологий широкое распространение получают сервис-ориентированные протоколы информационного взаимодействия устройств. Преимуществом сервис-ориентированной архитек-

туры является абстрагирование пользователей сервиса от деталей реализации самого сервиса.

Современные интеллектуальные алгоритмы и методы компенсации погрешностей являются ресурсоемкими, и их реализация на собственных микроконтроллерах датчиков затруднительна. Примером могут служить задачи интерполяции [3], в некоторых реализациях которой требуется нахождение обратной матрицы, являющейся ресурсоемкой задачей при больших размерностях матриц. Сервис-ориентированная архитектура позволяет перенести общие вычислительные задачи на соответствующую этим целям аппаратную составляющую, то есть организовать четкое деление по функционалу выполняемых задач. Датчик предоставляет данные об измеряемой величине, в то время как вычислительный ресурс выполняет ресурсоемкие операции. Датчик при этом может находиться при одних внешних условиях, а вычислительное оборудование при других.

Предлагаемая концепция работы интеллектуальных датчиков

На рисунке приведен пример работы интеллектуального датчика давления в сервис-ориентированной распределенной информационно-измерительной и управляющей системе (ИИУС). Под вычислительным ресурсом понимается высокопроизводительное и высоконадежное (относительно самих датчиков) вычислительное оборудование.



Пример работы интеллектуального датчика в распределенной ИИУС

Сервис статистической обработки и контроля достоверности данных абстрагируется от источников данных, реализуя только численные методы, которые не зависят от самой физической величины (температура в приведенном примере).

Интеллектуальные алгоритмы, реализуемые микроконтроллерами датчиков, обычно не являются универсальными и зависят от деталей конструктива. Их полный перенос в центральный модуль управления нецелесообразен. С другой стороны, ресурсы датчика (производительность, объем памяти) весьма ограничены. К тому же он может работать в жестких условиях воздействия дестабилизирующих факторов и включение в состав датчика высокопроизводительного процессора и микросхем памяти увеличит габариты, энергопотребление, стоимость и снизит его надежность. Сервис-ориентированная архитектура позволяет предоставить специализированным алгоритмам датчика практически неограниченные вычислительные ресурсы.

Применение сервис-ориентированной архитектуры дает дополнительные преимущества при реализации интеллектуальных функций. В ней уже заложены такие возможности, как автоматическое обнаружение доступных сервисов, автоматическое получение описания функций сервиса, возможность использования сервис-брокеров и других вспомогательных системных сервисов. Применение сервиса доставки сообщений (паттерн «издатель-подписчик») может быть ярким примером. Так, интеллектуальный датчик может «подписаться на канал», сообщая об исправности другого датчика или подсистемы. При возникновении нештатной ситуации он незамедлительно получит уведомление и сможет адаптировать алгоритмы своей работы – одна из основных функциональных возможностей интеллектуального датчика согласно ГОСТ Р 8.673–2009 ГСИ.

Использование сервис-ориентированной архитектуры часто подвергается критике в плане быстродействия и невозможности работы в режиме реального времени. Действительно, обычно данные кодируются несжатым текстовым форматом и передаются посредством протокола прикладного уровня HTTP, не оптимизированного на минимизацию задержек. Однако сервис-ориентированная архитектура не привязана к протоколам прикладного и даже транспортного уровней. Использование бинарного формата передаваемых сообщений и быстродействующего транспортного протокола, например UDP, совместно со средствами администрирования ИИУС позволяют достичь высоких показателей.

Выводы

Отличие от традиционной архитектуры распределенных ИИУС состоит в том, что датчики являются активными элементами, а не только предоставляют информацию для системы управления. Это позволяет создавать и применять алгоритмы и схемы анализа данных, недоступные в рамках классической архитектуры.

Развитие данного направления сдерживает отсутствие нормативной базы. Разработка стандартов, предназначенных для реализации интеллектуальных функций датчиков, унификации взаимодействия с учетом особенностей функционирования распределенных ИИУС, робототехнических комплексов и систем автоматизации позволит ускорить внедрение современных информационных технологий в измерительную технику и автоматизированные системы.

Список использованных источников и литературы

1. *Vasiliev, V. A.* Smart sensors, sensor networks, and digital interfaces / V. A. Vasiliev, P. S. Chernov // Measurement techniques. – 2013. – Vol. 55, no. 10. – Pp. 1115-1119.
2. *Yurish, S. Y.* Sensors: Smart vs. Intelligent // Sensors & Transducers. – 2010. – Vol. 114, issue 3. – Pp. 1-6.
3. Патент № 2300745 Рос. Федерация: МПК G01L 9/04. Устройство для измерения давления / Ю. Г. Свинолулов, В. В. Бычков. – Оpubл. 10.06.2007. – Бюл. № 16.

P. S. Chernov , CSc in engineering
E-mail: pvlvp@yandex.ru
Penza State University, Penza

The Operation Concept of Smart Sensors in Distributed Information-Measuring and Control Systems

The main features of smart sensor and its structure are given. The proposed methods make use of service-oriented architecture for implementation of intelligent capabilities and organizing general functioning. The application examples and additional advantages of the proposed approach are described.

Keywords: smart sensor, service-oriented architecture, communication.

УДК 000.42

Р. Э. Шибанов, аспирант

А. Д. Мерзлякова ^{✉^a}, магистрант

А. М. Тунгускова, магистрант

М. А. Шаклеин ^{✉^b}, студент

И. А. Кайсина, канд. техн. наук, доц.

E-mail: ^a m3rzl9.228@gmail.com, ^b shakleinmishka@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет

имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

Имитационное моделирование передачи видеоданных с борта БАС мультикоптерного типа по стандарту 802.11n

В статье представлены результаты имитационного моделирования процесса передачи данных по беспроводному каналу связи по стандарту 802.11n в имитационной среде NS-3. Была разработана программа для моделирования, произведена аналитическая и графическая оценка результатов. Проведен анализ зависимости коэффициента PDR от расстояния между узлами.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, передача данных, Wi-Fi, PDR, BPSK, QPSK, NS-3.

Введение

Беспилотные авиационные системы (БАС) получили широкое распространение в различных отраслях, основная цель БАС взлетной массой до 30 кг – проведение различного мониторинга. В качестве типа данных рассматривается видеопоток, к которому предъявляются требования передачи с минимальной задержкой и наилучшим качеством изображения.

Оперативность получения данных связана с решением задач в интересах МЧС. На текущий момент одной из проблем является защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Ежегодно в России возникает около 100 крупных наводнений. По данным МЧС, наиболее сложная обстановка в Пензенской, Самарской, Саратовской и Ульяновской областях [1]. Весенние паводки могут создать зоны затоплений, в которых проживает несколько миллионов человек, что может нанести серьезный ущерб. Сотрудникам МЧС ежедневно необходимо монито-

рить обстановку. Наиболее оптимальным вариантом является контроль зоны паводков, половодий при помощи беспилотников.

Вопросы качества передачи видеоданных рассматривали как отечественные, так и зарубежные ученые. В [2] авторы разработали систему выборочной ретрансляции для многоканальных систем. Суть заключалась в том, чтобы передать данные с заданными мощностью, количеством передач и полосой пропускания, используя разные схемы передачи.

В [3] исследуется возможность использования сетей мобильной связи общего пользования для передачи видеоданных. Авторы пришли к выводу, что такая передача возможна с обеспечением скорости передачи данных 1–1,5 Мбит/с.

Способы повышения качества видеотрафика при передаче исследуются в работах следующих отечественных ученых: Н. С. Жирнова [4], Е. П. Петрова [5], Р. В. Киричека [6], а также решаются лабораториями Communication System and Networks (г. Тампере), Lakeside Labs GmbH (г. Клагенфурт), EPFL (г. Лозанна), Universität Bern (г. Берн).

Актуальной темой также являются обнаружение, радиомониторинг и радиозлектронная борьба с БАС [7–11], что подчеркивает важность развития приемо-передающих устройств, которые используются в составе БАС.

Постановка задачи

В статье рассмотрен сценарий передачи видеоданных с борта БАС на наземную станцию оператора (рис. 1).

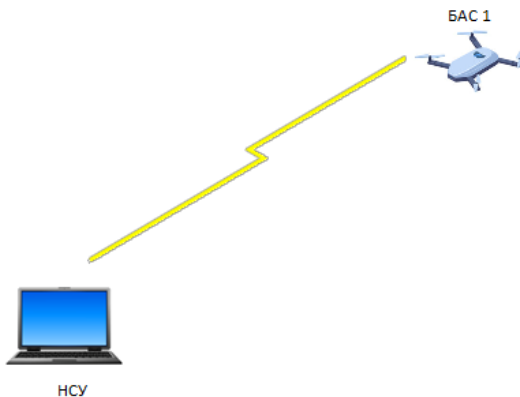


Рис. 1. Сценарий передачи данных

Для моделирования процесса передачи данных были взяты параметры, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Данные для проведения имитационного моделирования

Наименование параметров	Значения
TxPower, дБ	16
RxNoiseFigure, дБ	7
ChannelWidth, МГц	20
Frequency, Гц	5180
PropagationLossModel	FriisPropagationLossModel
PacketSize, байт	1250

В таблице:

TxPower (дБ) – мощность передатчика;

RxNoiseFigure (дБ) – коэффициент шума;

ChannelWidth (МГц) – ширина канала для стандартов семейства Wi-Fi 802.11 (на которой проводилось имитационное моделирование);

Frequency (Гц) – рабочие частоты для стандартов семейства Wi-Fi 802.11 (на которой проводилось имитационное моделирование);

PropagationLossModel – модель распространения радиосигнала в открытой среде (модель распространения была выбрана исходя из того, что БПЛА в основном выполняют миссии именно в открытом пространстве);

PacketSize (байт) – размер пакета в байтах.

Имитационное моделирование проводится в сетевом симуляторе NS-3 версии 3.40, из отличительных особенностей – добавлена поддержка операционной системы Windows и языка программирования Python.

Для моделирования был выбран стандарт 802.11n с частотой 5 ГГц и шириной канала 20 МГц [12]. Смоделированы модуляции типа BPSK и QPSK для достижения передачи видеоданных на расстояние от 500 до 1000 метров.

Для описания видеопотока в симуляторе используется пакетный процесс Пуассона – Парето, или PPBP (*от англ. Poisson Pareto Burst Process*), так как передача видео между узлами БАС происходит в режиме реального времени. Согласно этому процессу, «всплески информации» (то есть файлы) генерируются в соответствии с процессом Пуассона с параметром λ , размер любого из этих файлов подчиняется закону распределения Парето, и каждый из них передается с постоянной скоростью r [13].

Процесс является наиболее реалистичной моделью для описания пакетных систем. Более подробно данный процесс описан в [14, 15], ос-

новые его характеристики, которые были использованы при моделировании, представлены в табл. 2. При этом параметр Херста H принимает значения от 0,5 до 0,9.

Таблица 2. Математические параметры для процесса Пуассона – Парето

Параметр	Обозначение
Общее количество передач во временном интервале, шт.	λ
Скорость передачи, бит/с	r
Порядковый номер интервала передачи трафика	n
Трафик за интервал, бит	Xn
Средний трафик за интервал, бит	$E[Xn]$
Параметр формы распределения Парето	a
Параметр Херста	H

При проведении имитационного моделирования в качестве источника видеоданных рассматривался БАС мультикоптерного типа, прототипом для проведенного моделирования может служить квадрокоптер компании Copter Express Clever 4. В дальнейшем будет разработан пакет программ для моделирования прототипов промышленных БАС, таких как дроны Supercam X4 или X6 и Геоскан 801 или 401.

Результаты моделирования

Было проведено несколько итераций имитационного моделирования процесса передачи потоковых видеоданных от летающего узла источника к наземной станции управления, усредненные результаты которых представлены на рис. 2 и 3.

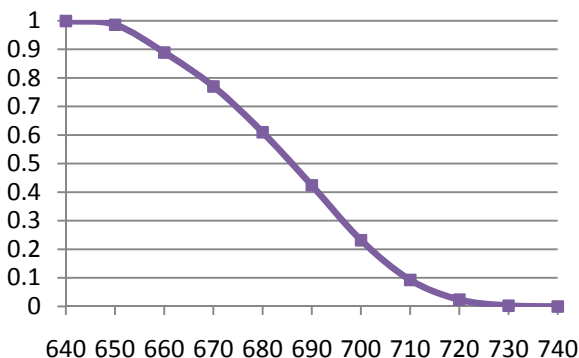


Рис. 2. Зависимость PDR от расстояния для стандарта 802.11n при модуляции BPSK, ширина канала 20 МГц

Как показано на рис. 2, связь с БАС начинает ухудшаться с 640 до 740 м, при PDR, значение которого меньше 0,9, наблюдается существенное снижение качества и ухудшение видеопотока.

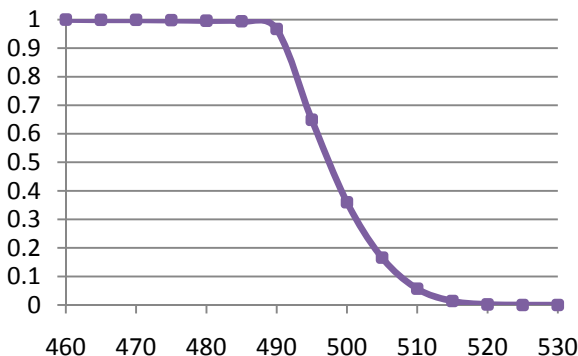


Рис. 3. Зависимость PDR от расстояния для стандарта 802.11n при модуляции QPSK, ширина канала 20 МГц

На рис. 3 видно, что для модуляции типа QPSK снижение PDR начинается намного раньше, с 490 и до 520 м, это следует из более высокой скорости передачи данных QPSK, что приводит к более низкой устойчивости к помехам и шумам, так как символы (кодируемые 2 бита информации) находятся ближе друг к другу в фазовой диаграмме. Это означает, что при использовании QPSK меньшие искажения могут привести к ошибкам в декодировании, чем в случае BPSK. Следовательно, использование модуляции QPSK ограничено 493 м, где PDR все еще больше 0,9.

Улучшить показатели дальности полетов, следовательно, и увеличить радиус мониторинга возможно с использованием реактивных или проактивных протоколов маршрутизации данных (AODV, OLSR и др.). Также возможно использование стандарта Wi-Fi 802.11ah, который используется на 900 МГц.

Выводы

В ходе исследования была разработана программа на языке C++ (17 стандарт), реализующая сценарии передачи потоковых видеоданных от летающего узла источника к наземной станции управления в сетевом симуляторе NS-3. Для получения более точных результатов было проведено несколько итераций имитационного моделирования. Как показа-

ли результаты, для проведения мониторинга БАС с применением стандарта 802.11n граничной дистанцией с $PDR > 0,9$ передачи видеосигнала является 660 м для модуляции BPSK и 493 м для модуляции QPSK. Были даны рекомендации по увеличению дистанции передачи данных, такие как: использование реактивных и проактивных протоколов маршрутизации, использование стандарта 802.11ah.

Список использованных источников и литературы

1. МЧС представило график развития паводков // Российская газета. – URL: <https://rg.ru/2023/03/20/reg-pfo/mchs-predstavila-grafik-razvitiia-pavodkov.html> (дата обращения: 29.09.2023).
2. Energy Efficiency, Spectral Efficiency and Delay Analysis for Selective ARQ Multichannel Systems / T. Shafique, A. M. Abdelhady, O. Amin, M. S. Alouini // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. – 2018. – Vol. 2 (3). – Pp. 612–622. – DOI: 10.1109/ TGCN.2018.2809729.
3. Баранов, А. А. Исследование возможности использования сетей мобильной связи общего пользования для передачи видеоданных с борта БЛА / А. А. Баранов, А. В. Никитина, О. А. Симонина // Труды учебных заведений связи. – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 16–26. – DOI: 10.31854/1813-324X-2022-8-1-16-26.
4. Жирнов, Н. С. Математическая модель метода разделения сетевых ресурсов для видео- и веб-трафика / Н. С. Жирнов, А. И. Ляхов, Е. М. Хоров // Информационные процессы. – 2019. – Т. 19, №1. – С. 1–15.
5. Петров, Е. П. Метод быстрой передачи многократного цифрового видео с нано беспилотных летательных аппаратов / Е. П. Петров, Н. Л. Харина, Е. Д. Ржаникова // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 160-летию со дня рождения А. С. Попова. В 6 т. Воронеж, 16–18 апр. 2019 г. Т. 2. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2019. – С. 258–266. – EDN FLMMFC.
6. Тестирование облачных систем видеоконференцсвязи на основе параметра Хёрста / Р. В. Киричек, А. А. Берёзкин, Д. С. Кукунин, А. В. Колесников // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 59–73. – DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-1-59-73.
7. Систему противодействия БПЛА разработали в РТУ МИРЭА // РИА Новости. – URL: <https://ria.ru/20230531/bpla-1875390668.html> (дата обращения: 15.09.2023).
8. Тамбовские студенты разработали систему подавления БПЛА // Вести Тамбов. – URL: <https://vestitambov.ru/new/tambovskie-studenty-razrabotali-sistemu-podavlenija-bpla/> (дата обращения: 25.09.2023).
9. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций / М. Б. Сергеев, А. А. Сенцов, Е. К. Григорьев, С. А. Ненашев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 3(30). – DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.038. – EDN ZWPYFN.

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023622602 Российская Федерация. Мобильные средства подавления БПЛА : № 2023622357 : заявл. 20.07.2023 : опублик. 28.07.2023 / С. А. Сахнов, М. С. Андрющенко, А. М. Голик [и др.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский военный ордена Жукова институт войск национальной гвардии Российской Федерации». – EDN VIJKHO.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663836 Российская Федерация. Имитационная модель однопозиционного метода определения местоположения наземного радиоизлучающего объекта системой радиомониторинга на базе БПЛА : № 2023662899 : заявл. 19.06.2023 : опублик. 28.06.2023 / В. С. Никонов. – EDN PHYFUF.

12. *Perahia, E.* IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology // Communications Magazine, IEEE. – 2008. – Vol. 46. – Pp. 48–55. – DOI: 10.1109/MCOM.2008.4557042

13. *Zukerman, M.* Introduction to Queueing Theory and Stochastic Teletraffic Models // Available from: <https://arxiv.org/abs/1307.2968> [Access 5th of October 2023].

14. *Кайсина, И. А.* Моделирование полезной пропускной способности сети БПЛА при мультипоточковой передаче // Труды учебных заведений связи. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 100–108. – DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-1-100-108.

15. *Кайсина, И. А.* Оценка влияния мультипоточковой передачи данных по модели Пуассона – Парето на метрику QoS для сети беспилотных летательных аппаратов в NS-3 / И. А. Кайсина, Д. С. Васильев, А. В. Абилов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 56–62. – DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-56-62. – EDN DSOVEI.

R. E. Shibanov, postgraduate student

A. D. Merzlyakova ^a, master student

A. M. Tunguskova, master student

M. A. Shaklein ^b, student

I. A. Kaisina, CSc in engineering, associate professor

E-mail: ^a m3rzl9.228@gmail.com, ^b shakleinmishka@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Simulation of Video Data Transmission from a Multicopter UAV Using the 802.11n Standard

The paper presents results of a data transmission simulation over a wireless communication channel using the 802.11n standard in NS-3. A modelling program was developed, the results were assessed analytically and graphically. PDR dependency on range between the nodes was analyzed.

Keywords: UAV, data transmission, Wi-Fi, PDR, BPSK, QPSK, NS-3.

Секция 5. Физико-математические методы в приборостроении

УДК 621.391.037.37:621.31

А. В. Глазырин[✉], аспирант

П. Ю. Майоров, магистрант

E-mail: ogre-mage8352@yandex.ru

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары

Адаптивный структурный анализ электрических сигналов с локальным нарушением закономерности

Статья посвящена методам восстановления потерянных данных в цифровых сигналах. Рассмотрены методы восстановления сигналов – использование предыдущего значения, нулевого значения, линейной интерполяции и экстраполяции. Определено влияние каждого метода на определение формы сигнала, амплитуды фазы, частоты сигнала.

Ключевые слова: адаптивный структурный анализ, интерполяция, экстраполяция, SV-потоки, релейная защита.

Введение

Традиционные микропроцессорные технологии подразумевают, что считывание аналоговых данных выполняется устройством с определенной частотой обновления. Однако в случае использования стандарта МЭК 61850-9-2 задача сбора данных возлагается на цифровые измерительные приборы (ЦИП) [1]. Это означает, что микропроцессорное устройство не может напрямую контролировать процесс поступления данных. Этот аспект может вызвать нежелательные явления, такие как задержка передачи данных по промышленной шине, что является особенностью систем цифровой передачи показаний тока и напряжения и может препятствовать эффективному решению прикладных вопросов.

В соответствии со стандартом МЭК 61850-9-2 IEC, каждый пакет данных должен содержать по одному значению для фазного тока и на-

пряжения, а также тока и напряжения нулевой точки. Алгоритмы обработки данных очень чувствительны к отсутствию даже одного значения. В таком случае устройство должно предпринять определенные действия, которые могут включать временное отключение некоторых функций или приближенное вычисление отсутствующего значения. Первое решение может негативно сказаться на работе системы защиты, поэтому приближенное вычисление считается более предпочтительным вариантом [2].

Методы быстрого восстановления потерянных отсчетов

Существуют различные способы восстановления потерянных данных, включая использование предыдущего значения, нулевого значения, интерполяцию, экстраполяцию и другие методы. Недостаток метода использования предыдущего значения заключается в том, что это может повлиять на определение частоты, поскольку она определяется на основе пересечений сигнала с 0. Недостатком использования нулевого значения является его низкая точность в восстановлении исходного значения. По этой причине в данной работе рассматриваются методы линейной интерполяции и экстраполяции.

Важно отметить, что существуют более точные методы приближения, которые являются более сложными в вычислительном плане и используют большее наблюдательное окно. В данной работе эти методы не обсуждаются.

Каждый из рассмотренных методов восстановления данных имеет определенную степень погрешности при восстановлении исходного значения, и эта погрешность зависит от утерянного значения (например, если был утерян локальный максимум сигнала, использование нулевого значения для замены утерянных данных приведет к максимальной погрешности). Погрешность при восстановлении сигнала также влияет на точность определения структуры цифрового сигнала, так как погрешность может изменять форму сигнала.

Методы распознавания сигнала

Неадаптивные методы распознавания сигнала. Для оценки амплитуды и фазы основной гармоники токов и напряжений в цифровых системах релейной защиты и автоматики, как правило, используют неадаптивный метод распознавания сигнала – фильтр Фурье. Алгоритм Фурье подавляет кратные гармоники и высокочастотные шумы во входном сигнале за счет усреднения оцениваемой гармоники в течение периода. Соответственно, быстроедействие устройств оценки фазора основной

гармоники с помощью классического алгоритма Фурье не может быть быстрее одного периода [3].

Адаптивные методы распознавания сигнала. Сигнал аварийного режима включает в себя составляющие принужденного режима и свободного движения электрической системы.

Анализируемый сигнал содержит всю информацию о режиме электрической системы. Структура цифрового сигнала аварийного процесса будет распознана, если для каждого компонента сигнала текущего режима получится подобрать свой фильтр заграждения. Следовательно, любая модель сигнала текущего режима электрической сети может быть представлена как каскад канонических моделей, каждая из которых формирует слагаемую сигнала на основе заграждающего фильтра компонента базиса собственных мод.

Точность методов распознавания сигналов

Данные для сигнала были взяты из исследования [3]:

$$x(t) = 2,73 \cos(2\pi 50,18t + 2,77) + 0,089 \cos(2\pi 150,54t + 2,02) + 2,29e^{-72t} + w(t). \quad (1)$$

Этот сигнал содержит первую и третью гармоники, периодическую составляющую и шумовой компонент (рис. 1).

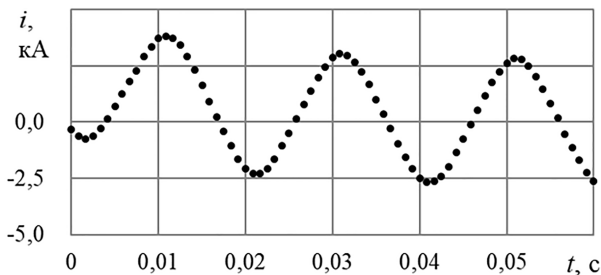


Рис. 1. Вид исходного сигнала

Иллюстрация восстановления сигнала показана на рис. 2: «←» – «потерянный» отчет, «*» – восстановленный отчет, «+» – отчет, который участвует в восстановлении.

Порядок адаптивного структурного шаблона ($M = 14$) был выбран больше порядка значимого сигнала ($Ms = 5$), а длина окна наблюдения ($W = 29$) была определена.

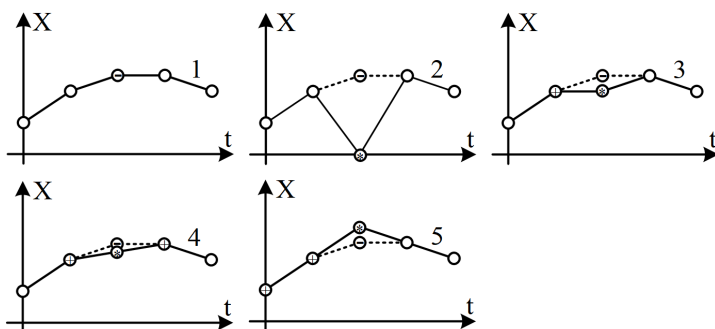


Рис. 2. Иллюстрация восстановления отчета сигнала: исходный сигнал (кривая 1), принятие нулевого значения (кривая 2), использование предыдущего значения (кривая 3), линейная интерполяция (кривая 4), линейная экстраполяция (кривая 5)

Фильтр Фурье. Для оценки точности метода восстановления сигнала использовалось относительное отклонение оценки амплитуды и фазы с помощью алгоритма Фурье для сигнала без потерянных данных и сигнала с восстановленными данными. Полученные результаты представлены в табл. 1 (проводился ряд испытаний восстановления данных: восстановление локального максимума, локального минимума, ближайшего к нулю элемента, произвольного элемента, но не максимального, минимального или нулевого; в таблице представлено среднее значение относительной погрешности оценки амплитуды и фазы исследуемого сигнала всех испытаний) [4, 5].

Таблица 1. Погрешность определения частоты основной гармоники

Метод восстановления	Относительная погрешность оценки амплитуды исследуемого сигнала, %	Относительная погрешность оценки фазы исследуемого сигнала, %
Принятие нулевого значения	5,66	0,7725
Использование предыдущего отсчета	0,72	0,375
Линейная интерполяция	0,1875	0,0425
Линейная экстраполяция	0,5025	0,125

Адаптивный структурный анализ. Погрешность аппроксимации влияет на точность структурного анализа цифрового сигнала. В качестве примера влияния аппроксимации на структурный анализ сигнала рассмотрим компонентный анализ для каждого метода восстановления данных на примере четырех точек: локальный минимум, локальный

максимум, ближайшая точка пересечения с нулевой линией и произвольная точка.

Точность метода аппроксимации оценивалась по относительному отклонению определения частоты основной гармонической составляющей по сравнению с исходным сигналом без утерянных точек. Результаты приведены в табл. 2 (проводился ряд испытаний восстановления данных: восстановление локального максимума, локального минимума, ближайшего к нулю элемента, произвольного элемента, но не максимального, минимального или нулевого; в таблице представлено среднее значение относительной погрешности оценки частоты исследуемого сигнала всех испытаний и наибольшее отклонение частоты от частоты исследуемого сигнала) [6, 7].

Таблица 2. Погрешность определения частоты основной гармоники

Метод восстановления	Частота основной гармоника, Гц	Относительная погрешность, %
Нет потерянного отсчета	50,18	0
Принятие нулевого значения	43,98	4,1967
Использование предыдущего отсчета	49,82	0,4675
Линейная интерполяция	50,23	0,115
Линейная экстраполяция	50,66	0,3325

Выводы

1. Методы восстановления информации играют важную роль в обработке цифровых сигналов, позволяя компенсировать потерю данных и улучшить точность анализа сигнала. Рассмотренные методы, такие как использование предыдущего значения, нулевого значения, линейная интерполяция и экстраполяция, имеют свои преимущества и недостатки.

2. Погрешность восстановления данных влияет на определение формы сигнала и его характеристик. В частности, погрешность может привести к изменению амплитуды, частоты и фазы сигнала, а также к неправильной идентификации его структуры.

3. Адаптивный структурный анализ является мощным инструментом для исследования цифровых сигналов и определения их характеристик. Однако его точность также зависит от качества исходных данных, в частности от точности восстановления утерянных отсчетов сигнала.

4. Результаты исследования показывают, что наиболее точным методом восстановления данных является интерполяция, однако этот метод может быть сложно применимым в некоторых ситуациях. Другие рассмотренные методы, такие как линейная экстраполяция, также обеспе-

чивают приемлемую точность восстановления данных и могут быть более подходящими для некоторых приложений.

5. В целом выбор метода восстановления данных зависит от специфики задачи и требований к точности анализа сигнала.

Список использованных источников и литературы

1. Функциональная совместимость устройств РЗА мультивендорных цифровых подстанций / Е. С. Воробьев, В. И. Антонов, В. А. Наумов и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2. – С. 42–45.

2. Воробьев, Е. С. Реконструкция подстанции с применением МЭК 61850 / Е. С. Воробьев, А. В. Глазырин // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : материалы V Всерос. науч.-техн. конф., Махачкала, 25–26 дек. 2019 г. – Махачкала : Информ.-полиграф. Центр ДГТУ. – 2019. – С. 162–166.

3. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. – Чебоксары : Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова, 2018. – 334 с. – ISBN 9785767725717.

4. Цифровая обработка сигналов в устройствах интеллектуального АПВ ЛЭП с шунтирующими реакторами / Н. Г. Иванов, М. И. Александрова, Е. С. Воробьев [и др.] // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апр. 2021 г. – Чебоксары : Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова. – 2021. – С. 99–107.

5. Многоканальный адаптивный структурный анализ / Е. С. Воробьев, В. И. Антонов, Н. Г. Иванов [и др.] // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики : материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апр. 2021 г. – Чебоксары : Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова. – 2021. – С. 114–120.

6. Принципы управления размерностью структурных моделей электрических сигналов интеллектуальной энергетики / Е. С. Воробьев, В. И. Антонов, В. А. Наумов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 1 (42). – С. 30–37.

7. Воробьев, Е. С. Аппроксимация потерянных отсчетов в SV-потоках // Ползуновский альманах. – 2020. – № 1. – С. 14–18.

A. V. Glazyrin [✉], postgraduate student

P. Yu. Mayorov, master student

E-mail: ogre-mage8352@yandex.ru

I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary

Adaptive Structural Analysis of Electrical Signals with Local Pattern Violation

The article is devoted to the methods of recovering lost data in digital signals. The methods of signal reconstruction are considered – using the previous value, zero value, linear interpolation and extrapolation. The influence of each method on the determination of the signal shape, phase amplitude, and signal frequency is determined.

Keywords: adaptive structural analysis, interpolation, extrapolation, SV flows, relay protection.

УДК 528.8

И. Е. Гусаров^{1,2} ✉, аспирант, мл. науч. сотр.
А. И. Калугин^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ст. 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, г. Ижевск

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Влияние параметров сканирующих систем на размеры лазерного пятна

В работе проанализирована связь таких параметров, как частота следования лазерных импульсов, максимальная эффективная дистанция сканирования, время построения кадра и параметра, определяющего качество получаемого изображения, а именно радиуса лазерного пятна в плоскости наблюдения. Показано, что для получения кадра сканирования с высоким качеством эффективная дистанция сильно ограничена частотой следования лазерных импульсов. Для сохранения заданной дистанции сканирования следует увеличить время построения кадра и/или снизить требования к качеству получаемого кадра.

Ключевые слова: лазерное сканирование, параметры лазерного сканера, эффективная дистанция сканирования, качество кадра сканирования, время построения кадра сканирования.

Введение

В настоящий момент технология лазерного сканирования становится всё более востребована и уже нашла применение во многих областях деятельности человека, таких как геодезия, контроль инженерных систем и сооружений, экологический мониторинг и прочих сферах. Очевидно, что для решения конкретной задачи параметры разрабатываемого лазерного сканера должны удовлетворять предъявляемым к устройству техническим требованиям, к числу которых относятся максимальная эффективная дистанция сканирования, время полного сканирования, угловой размер исследуемой области и качество получаемого кадра. 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. Под-

тверждением 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.

Качество изображения, получаемого при работе лазерного сканера, служит главным критерием оценки эффективности работы устройства. Данная характеристика определяется множеством параметров. К их числу относятся: коэффициент перекрытия лазерных пятен, величина искажения траектории сканирования, соотношение размера пятна и размера объектов, составляющих исследуемое пространство, и т. д. Они также зависят от других параметров системы. Так, из работы [2] следует, что при использовании предобъективной схемы сканирования особые требования предъявляются к объективу устройства. Задача минимизации искажений получаемого кадра вследствие аберраций потребует использования сложных многолинзовых оптических систем. В работе [3] затрагивается проблема возникновения искажений кадра сканирования и описываются параметры различных типов лазерных сканаторов, влияющие на возникновение дефектов траектории сканирования. Зависимость эффективной дистанции сканирования от радиуса лазерного пучка проанализирована в работе [4].

Из проведенного обзора следует вывод о том, что при разработке лазерного сканера следует учитывать взаимосвязь множества параметров устройства. Главной проблемой при решении данной задачи является, во-первых, существование как прямых, так и косвенных зависимостей параметров, во-вторых, наличие прямых и обратных зависимостей в системе. Отсюда возникает проблема, связанная с необходимостью проведения многопараметрического анализа, что требуется для выбора оптимальных характеристик разрабатываемого устройства.

Целью данной работы является анализ зависимости радиуса лазерного пятна от других параметров системы.

Постановка задачи

Для заполнения исследуемого пространства с заданными угловыми размерами, находящегося на некотором удалении от лазерного сканера, за требуемое время необходим лазерный источник, который может обеспечить минимальную частоту следования импульсов, определяемую следующим выражением:

$$\nu = \frac{L^2 \theta \gamma}{4r^2 (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) t_k}, \quad (1)$$

где ν – частота следования лазерных импульсов; L – максимальная эффективная дистанция сканирования; θ – азимутальный угол сканирования; γ – зенитный угол сканирования; η_1 – коэффициент перекрытия пятен в строке; η_2 – коэффициент перекрытия строк в кадре; t_k – требуемое время построения кадра; r – радиус пятна в плоскости, лежащей на расстоянии L .

Очевидно, что при заданном выходном радиусе пучка и некоторой расходимости лазерного излучения величина параметра r возрастает при увеличении максимальной дистанции L . В то же время для достижения максимального качества получаемого кадра радиус пятна в исследуемой плоскости должен быть меньше поперечного размера объектов, составляющих зондируемое пространство. При этом значение коэффициентов перекрытия выбирается таким образом, чтобы добиться максимально возможной степени заполнения сканируемой области пятнами лазерного излучения. Однако следует понимать, что построение кадра сканирования при значениях параметров r , η_1 и η_2 , близких к идеальным, потребует использования источника с такой частотой повторения импульсов, реализация которой невозможна в современных серийно выпускаемых лазерах.

Результаты и их обсуждение

Зависимость частоты следования импульсов от максимальной дистанции сканирования приведена на рисунке 1, *а*, зависимость радиуса лазерного пятна в плоскости сканирования от требуемого времени построения кадра приведена на рисунке 1, *б*. Результаты получены при следующих значениях: $\theta = \gamma = \pi/3$, $\eta_1 = \eta_2 = 0,5$, $t_k = 1$ с (рис. 1, *а*), $\nu = 0,5$ МГц (рис. 1, *б*).

Проведя анализ зависимости, представленной на рис. 1, *а*, можно сделать вывод о том, что для осуществления задачи сканирования при значительном расстоянии L следует использовать лазерный источник, обладающий высокой частотой следования импульсов. Максимальная дистанция зондирования ограничена радиусом пятна на требуемом расстоянии. Зондирование пространства на малом расстоянии широким пучком позволит уменьшить частоту импульсов, но, с другой стороны, значительно снизит качество получаемого изображения. В случае, когда максимальная дистанция L превышает несколько километров, использование широких пучков не потребует высоких значений частоты следования импульсов для заполнения исследуемой области, но в этом случае для достижения требуемого качества кадра необходимо увеличить значение параметра t_k . Из рис. 1, *б* видно, что для небольших t_k наблюдается резкое падение значений r . При этом диапазон значений t_k , внутри

которого происходит наиболее эффективное уменьшение радиуса пятна, имеет различные границы для разных дистанций L . Так, для кривой, соответствующей $L = 500$ м, переход в область плавного изменения величины r наблюдается после границы $t_k \approx 1.5$ с, в то время как кривая, полученная при $L = 2000$ м, продолжает резко падать до $t_k \approx 4$ с.

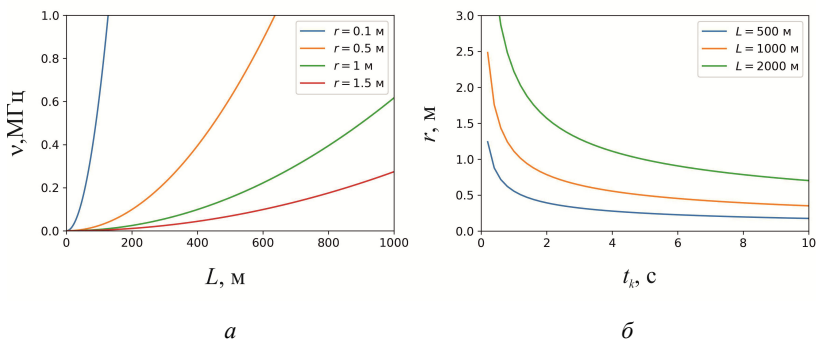




Рис. 1. Графики зависимости частоты следования импульсов от максимальной дистанции сканирования (а) и радиуса лазерного пятна в плоскости сканирования от требуемого времени построения кадра (б)

Выводы

В работе показаны и проанализированы зависимости частоты импульсов и радиуса лазерного пятна от внешних условий работы, таких как максимальная дистанция сканирования и время построения кадра сканирования. В результате анализа можно сделать вывод о том, что зондирование области пространства, находящегося на некотором удалении от лазерного сканера, может быть неосуществимо при заполнении кадра сканирования лазерным пучком с малым радиусом, величина которого позволила бы получить максимальное качество кадра при осуществлении необходимой задачи. Во избежание данного ограничения следует изменить требование к времени построения кадра, что позволит уменьшить размер пятна и тем самым оставить качество изображения на необходимом уровне или же снизить качество кадра при сохранении требуемого времени сканирования.

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. Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision applications / V. I. Yurevich, V. A. Grimm, A. A. Afonyushkin, K. V. Yudin, S. G. Gorny // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 6, Optical Design and Engineering, Jena, 07-10 September 2015. – Jena, 2015. – P. 96261S. – DOI: 10.1117/12.2190777. – EDN [WUYWOR](#).
3. Выбор сканера для лазерной локационной системы / С. И. Артамонов, Н. А. Грязнов, В. И. Купренюк, Н. А. Романов, Е. Н. Соснов // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 9. – С. 51–59. – EDN [WRLEFP](#).
4. *Авхадеев, В. Г.* Особенности сканирующих устройств лазерных локационных систем / В. Г. Авхадеев, О. А. Корчагина, Е. О. Замятина // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 68–70. – EDN [VZWZAL](#).

I. E. Gusarov^{1,2} , postgraduate student, junior researcher
A. I. Kalugin^{1,2}, CSc in phys. and math., senior 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

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Influence of Scanning System Parameters on Laser Spot Sizes

The work analyzes the relationship between such parameters as the laser pulse repetition rate, the maximum effective scanning distance, the scanning time and the parameter that determines the quality of the resulting image, namely the radius of the laser spot in the observation plane. It is shown that to obtain a scanning frame with high quality, the effective distance is strongly limited by the laser pulse repetition rate. To maintain the specified scanning distance, it is necessary to reduce the scanning time and/or reduce the requirements for the quality of the resulting frame.

Keywords: laser scanning, laser scanner parameters, effective scanning distance, scanning frame quality, scanning time.

УДК 53.087.64

*П. Р. Козицын*¹✉, магистрант
Д. Г. Калюжный^{1,2}, канд. техн. наук, доц.
E-mail: kozicyn.pasha@gmail.com✉

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

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Метод позиционирования лазера на основе резистивной плёнки с хромель-алюмелевым покрытием

В данной статье предложен метод позиционирования лазера, который основан на использовании свойств резистивных покрытий. Рассмотрены преимущества и недостатки разработанного метода относительно существующих. Проведен эксперимент по изучению зависимости термоЭДС от области облучения тонкопленочного покрытия хромель-алюмель.

Ключевые слова: лазерная система позиционирования, резистивные пленки, тонкопленочные покрытия, пленка хромель-алюмель.

Введение

Лазерные технологические комплексы с современными источниками излучения способны обеспечивать очень высокую стабильность пространственно-временных характеристик излучения в широком диапазоне значений. В настоящее время зарубежные компании, производящие лазерные технологические производственные комплексы, практически завершили переход на пико- и фемтосекундные лазеры, работающие на излучении ионов Nd³⁺ в третьей и четвертой гармониках. Благодаря этому уменьшается размер зоны термического воздействия, а также радиус в области взаимодействия с веществом, что, как правило, приводит к увеличению разрешения процесса до субмикронного. В системах высокого класса традиционно используются прецизионные линейные приводы, которые также обеспечивают высокую точность позиционирования лазерного пучка. Однако системы на базе таких устройств, к которым предъявляются повышенные требования к скорости позиционирования, точности, а также повторяемости, имеют настолько чрезвычайно высокую стоимость, что даже для крупных государственных предприятий их приобретение становится серьезной проблемой.

В работах [1–6] описаны теоретические обоснования возможности создания лазерной системы позиционирования на основе резистивных пленок. В настоящей работе будет рассмотрена возможность создания данной системы на основе резистивной пленки хромель-алюмель. Системы лазерного позиционирования на основе резистивных плёнок отличаются низкой стоимостью производства, относительной простотой и точностью, сравнимой с современными системами позиционирования.

Описание эксперимента

При проведении эксперимента использовалась хромель-алюмелевая резистивная пленка, нанесенная на подложку методом магнетронного распыления. Размеры пленки 9 мм на 15 мм. Данная пленка закреплялась в специальном экранированном корпусе, к краям пленки были подведены электроды, с помощью которых снималась термоЭДС, которая образовывалась при облучении CO_2 лазером мощностью 40 Вт в течение 10 секунд. Диаметр лазерного пятна 80 мкм, расстояние от выходной линзы объектива до поверхности пленки 8 мм. На рис. 1 показан макет устройства приема сигнала, в который закреплялась пленка.

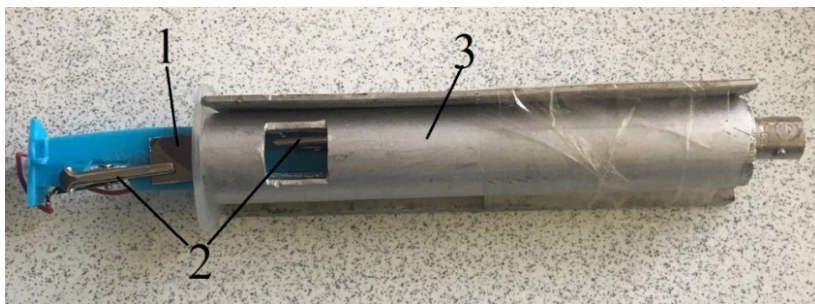


Рис. 1. Внешний вид устройства приема сигнала:
1 – хромель-алюмелевая резистивная плёнка, 2 – электроды, 3 – защитный экран

Данный макет был закреплен в координатном столе, после каждого измерения пленка сдвигалась с шагом 0,3 мм относительно лазерного пятна. Измерения проводились по всей длине пленки (условно принята за координату X) перпендикулярно линии раздела хромель-алюмель. После каждого измерения пленка остывала 30 секунд.

Электрический сигнал, обусловленный возникновением термоЭДС при облучении пленки лазером, с электродов поступал на усилитель и затем, после преобразования, на осциллограф, на экране которого регистрировалась форма полученных импульсов.

Результаты эксперимента

На рис. 2 показаны данные измерений зависимости термоЭДС от координат хромель-алюмелевой резистивной пленки. Значения термоЭДС указаны после усиления сигнала. Точками показаны значения, измеренные во время эксперимента, сплошной линией изображен аппроксимированный график. Максимум полученной кривой соответствует границе между напылением хромеля и алюминия.

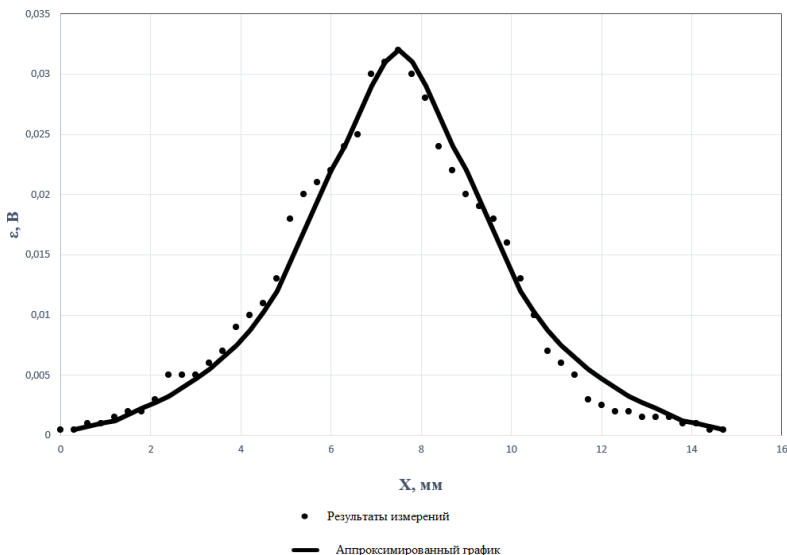



Рис. 2. Данные измерений зависимости термоЭДС от координат хромель-алюмелевой резистивной пленки

Выводы

В ходе проведения эксперимента была установлена зависимость, которая показывает, что в зависимости от области облучения хромель-алюмелевой резистивной пленки получают различные значения термоЭДС, что можно использовать, например, в качестве датчика нуля в системах позиционирования лазера.

Список использованных источников и литературы

1. *Михеев, Г. М.* Генерация наносекундных электрических импульсов при лазерном облучении графитных пленок / Г. М. Михеев, Р. Г. Зонов, А. Н. Образцов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 33–37. – EDN HVEYNP.
2. *Михеев, Г. М.* Светоиндуцированная эдс в серебро-палладиевых резистивных пленках / Г. М. Михеев, Р. Г. Зонов, В. А. Александров // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, № 14. – С. 79–87. – EDN RCVJIR.
3. *Михеев, Г. М.* Наблюдение циркулярного фотогальванического эффекта в серебро-палладиевых резистивных пленках / Г. М. Михеев, В. А. Александров, А. С. Саушин // Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37, № 12. – С. 16–24. – EDN RCVNTH.
4. Влияние температурного воздействия в вакууме на поляризационно-ориентационно чувствительный фототок в нанокompозитных Ag/Pd плёнках / А. С. Саушин, Р. Г. Зонов, Е. В. Александрович [и др.] // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 75–85. – DOI: 10.15350/17270529.2019.1.11. – EDN STEUPM.
5. *Александров, В. А.* Поверхностная термоЭДС в серебро-палладиевых толстопленочных резисторах // Вестник Удмуртского университета. Серия Физика и химия. – 2012. – № 4. – С. 18–21. – EDN PVVGHJ.
6. *Калюжный, Д. Г.* Применение толстых Ag-Pd-пленок для измерения параметров лазерного излучения / Д. Г. Калюжный, В. А. Александров, В. В. Бесононов // Прикладная физика. – 2016. – № 3. – С. 81–84. – EDN WCKJTR.

*P. R. Kozitsyn*¹ , student

D. G. Kalyuzhny^{1,2}, CSc in engineering.

E-mail: kozicyn.pasha@gmail.com

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Laser Positioning Method Based on Resistive Film with Chromel-Alumel Coating

In this article, a method of the laser positioning system is proposed, which is based on the use of the properties of resistive coatings. The advantages and disadvantages of the developed method relative to the existing ones are also considered. An experiment was carried out to study the dependence of the thermal EMF on the coordinates of the chromel-alumel thin-film coating.

Keywords: laser positioning system, resistive films, thin-film coatings, chromel-alumel film.

УДК 535.3

Д. Н. Кочурова^{1,2}✉, аспирант, мл. науч. сотр.
А. И. Калугин^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, ст. 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, г. Ижевск

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Выбор начального приближения при моделировании распространения лазерного пучка

В работе предложен метод начального приближения лазерного пучка для задач его распространения в атмосфере. Рассмотрены различные способы формирования направления распространения лазерного излучения при прохождении через атмосферу. Смоделировано прохождение лазерного импульса через пустое пространство для различных способов. Выделены достоинства и недостатки каждого способа.

Ключевые слова: гауссов пучок, метод характеристик, атмосферная турбулентность.

Введение

Моноимпульсный лазерный локационный метод обнаружения и распознавания объектов является перспективным в задачах зондирования атмосферы. В этом случае распознавание происходит на основе анализа временной зависимости мощности сигнала, принятого после отражения от объекта [1]. При этом искажения во временную форму вносит среда распространения – атмосфера, которая, как правило, является турбулентной. Поэтому существует задача нахождения этих искажений с целью восстановления истинной формы сигнала. Решить данную проблему можно с помощью численного моделирования взаимодействия лазерного излучения с атмосферой. В основе моделирования прохождения лазерного излучения через атмосферу лежит решение уравнения переноса излучения в стационарном приближении без учета рассеяния излучения. В частности, в данной работе применяется численный метод решения уравнения – метод характеристик [2, 3], в котором вдоль каждой характеристики (луча) решается обыкновенное дифференциальное уравнение. Лазерный пучок представляется в виде набора лучей. Нема-

ловажным является выбор направлений, вдоль которых рассматривается распространение излучения, что является целью представленной работы.

Методика

Для определения направлений могут использоваться узлы квадратной формулы для сферы [4], когда в качестве начала луча рассматривается центр сферы. Также с этой целью рассматривался так называемый метод S_N разбиения сферы [5], в котором сфера делилась на фигуры равной площади. В обоих случаях узлы лежат на окружностях, принадлежащих сфере.

В настоящей работе предлагается следующий метод выбора направлений распространения излучения. Выбирается плоскость выходного окна лазерной установки, лазерное сечение в этой плоскости имеет форму круга. Предлагается заполнять данный круг точками, которые будут являться началом луча. Направления крайних лучей выбираются под углом к оси излучения, равным энергетическому углу расходимости лазерного пучка. Направления внутренних лучей линейно зависят от расстояния до центра пучка.

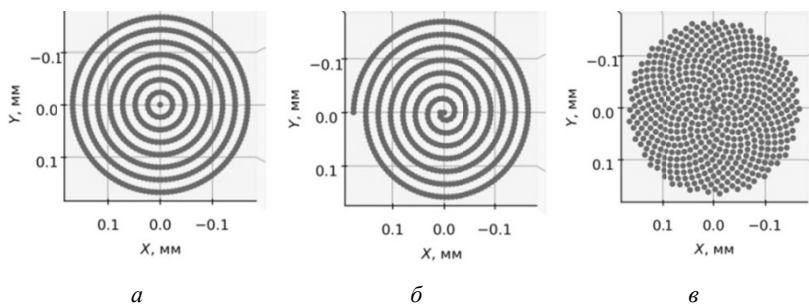


Рис. 1. Способы задания начального распределения точек: концентрические окружности (а), спираль Пифагора (б), угловая спираль (в)

Рассмотрим три способа распределения точек в поперечном сечении пучка: точки расположены на концентрических окружностях, аналогично случаю, представленному в [4, 5] (способ № 1, рис. 1, а); точки расположены вдоль спирали Пифагора, в вершинах прилегающих друг к другу прямоугольных треугольников, один из катетов которых равен единице (способ № 2, рис. 1, б) [6]; «угловая» спираль [7], в случае которой новая точка образуется из предыдущей путем поворота на определенный угол $\pi(3 - \sqrt{5})$ и одновременного увеличения радиального расстояния (способ № 3, рис. 1, в).

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты моделирования временной формы импульса, прошедшего 1 км пустого пространства без атмосферы (графики смещены друг от друга по высоте для наглядности). Для моделирования использовалась разработанная авторами статьи компьютерная программа, реализованная на языке программирования C++.

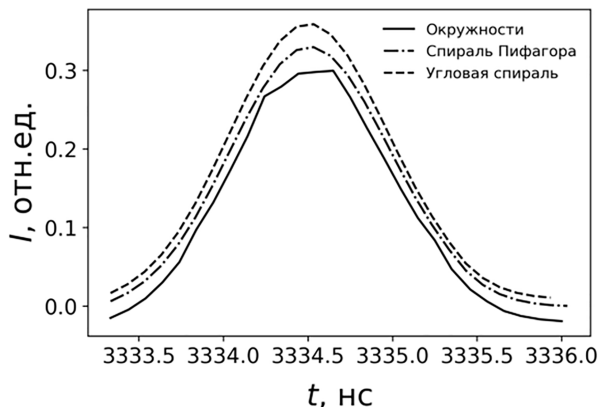


Рис. 2. Временная форма импульса

Начальная временная форма импульсов имела колоколообразный гауссов вид длительностью 1 нс, угол расходимости равен 20 мрад. Проанализировав график, можно увидеть, что форма импульса, полученная при использовании распределения точек № 1, заметно отличается. Объяснить данные результаты можно следующим образом. Лучи, начала которых лежат на определённой окружности, имеют одинаковый угол расходимости, и, следовательно, все они проходят одинаковые расстояния до плоскости наблюдения и достигают ее в одно и то же время. Таким образом, в плоскость наблюдения поступает дискретный набор последовательных импульсов, сформированных лучами из точек окружностей, следующих друг за другом. Эта проблема проявляется сильнее с увеличением расходимости лазерного пучка или проходимой им дистанции. При моделировании согласно спирали Пифагора достигаются лучшие результаты временной зависимости. В этом случае шаг разницы времен прихода лучей постоянен и количество лучей, приходящихся на одно время записи приемника, примерно постоянно. Распределение точек по «угловой спирали» не сильно уступает спирали Пифагора во

временной области, но при этом имеет равномерное распределение точек и намного лучше описывает пространственное распределение гауссова пучка в поперечном сечении. Кроме того, оно позволяет использовать меньшее количество лучей и, следовательно, меньшее время расчета для получения достоверных результатов в отношении временной зависимости и в отношении пространственного распределения интенсивности. Поэтому «угловая» спираль является оптимальным способом выбора распределения стартового положения лучей.

Выводы

Выбор направлений, вдоль которых решается уравнение переноса, влияет на временную форму сигнала, проходящего атмосферу. «Угловая» спираль является оптимальным способом выбора распределения стартового положения лучей как для временной формы сигнала, так и для пространственного распределения интенсивности лазерного излучения.

Список использованных источников и литературы

1. *Лабунец, Л. В.* Распознавание 3D-объектов в однопозиционной системе лазерной локации методами интеллектуального анализа импульсных отражательных характеристик / Л. В. Лабунец, А. Б. Борзов, И. М. Ахметов // *Оптический журнал.* – 2022. – Т. 89, № 4. – С. 40–51. – DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-04-40-51. – EDN **NMINEX**.
2. *Accurate Short-Characteristics Radiative Transfer in A Numerical Tool for Astrophysical RESearch (ANTARES)* / N. M. Kostogryz, F. Kupka, D. Krüger, L. Gizon, D. Fabbian, N. Piskunov // *Solar Physics.* – 2021. – Vol. 296, no. 3. – DOI: 10.1007/s11207-021-01777-6. – EDN **LFMYHA**.
3. *Дудоров, В. В.* Модель совместного учета турбулентных искажений и аэрозольного рассеяния при формировании когерентных и некогерентных изображений объекта // *Оптика атмосферы и океана.* – 2017. – Т. 30, № 7. – С. 567–574. – DOI: 10.15372/AOO20170704. – EDN **ZBTLXP**.
4. *Волощенко, А. М.* Квадратурные формулы типа Гаусса для сферы с узлами, обладающими симметрией правильной призмы / А. М. Волощенко, А. А. Руссков // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* – 2020. – Т. 60, № 7. – С. 1095–1110. – DOI: 10.31857/S004446692007011X. – EDN **ZODMRG**.
5. *Галанин, М. П.* Методы решения уравнения переноса излучения для астрофизических моделей / М. П. Галанин, В. В. Лукин, В. М. Четчин // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* – 2010. – № 59. – С. 1–30. – EDN **OYCQNZ**.
6. *Hahn, H. K.* The distribution of prime numbers on the square root spiral / H. K. Hahn, R. Sachs // *arXiv: General Mathematics.* – 2008. – Pp. 1-35. – DOI: 10.48550/arXiv.0801.1441.
7. *Vogel, H.* A better way to construct the sunflower head // *Math. Biosci.* – 1979. – Vol. 44, no. 3-4. – Pp. 179-189. – DOI: 10.1016/0025-5564(79)90080-4.

D. N. Kochurova^{1,2}✉, postgraduate student, junior researcher
A. I. Kalugin^{1,2}, CSc in phys. and math., senior researcher
E. A. Antonov^{1,2}, CSc in phys. and math., senior researcher
E-mail: darya310898@gmail.com✉

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Choosing an Initial Approximation when Modeling Laser Beam Propagation

The paper proposes a method for the initial approximation of a laser beam for problems of its propagation in the atmosphere. Various methods for shaping the direction of propagation of laser radiation when passing through the atmosphere are considered. The passage of a laser pulse through empty space was simulated for various methods. The advantages and disadvantages of each method are highlighted.

Keywords: Gaussian beam, method of characteristics, atmospheric turbulence.

УДК 681.7.068

Я. Э. Садовникова^{1,2, ✉^a}, канд. техн. наук, доц.

А. В. Офицерова^{1, ✉^b}, студент

E-mail: ^a yanasadovnikova@gmail.com, ^b anna270702@mail.ru

¹ Ижевский государственный технический университет

имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск

² МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва

Оценка потерь в волоконно-оптической трассе с локальными дефектами на основе анализа заданной рефлектограммы

По заданной рефлектограмме линейной волоконно-оптической трассы была проведена идентификация различных типов событий, анализ локальных дефектов, их местонахождение на трассе, определена величина потерь и отражающая способность. На основе проведенного анализа дано схематическое изображение трассы и произведена ее оптимизация.

Ключевые слова: рефлектограмма, ВОЛС, оптоволокно, связь.

Введение

В условиях постоянного роста потребности современного общества в получении информации задача обеспечения требуемого качества и скорости связи базируется на внедрении инновационных волоконно-оптических технологий. По мере распространения в волоконном световоде световое излучение теряет свою энергию. Такое затухание сигнала при прохождении по оптическому волокну должно быть минимальным, чтобы можно было покрывать все большие расстояния без установки ретрансляторов.

Сведения из теории

Одними из наиболее мощных приборов для тестирования волоконно-оптических линий связи являются рефлектометры, которые находят применение во время строительства, аттестации, эксплуатационного обслуживания, проофилактических проверок, ремонтно-восстановительных и других работ [1]. Импульсный оптический рефлектометр работает по принципу измерения мощности светового излучения, которое рассеивается или отражается различными участками волоконно-оп-

тической линии связи при распространении вдоль нее короткого зондирующего светового импульса [2, 3].

Постановка задачи

Проанализировать результат временной зависимости излучения, распространяющегося в реальной волоконно-оптической трассе, прошедшего на фотоприёмник рефлектометра, получить данные для расчета затухания в волоконно-оптической линии связи. Такими данными будут являться локализация неисправностей и их примерное происхождение.

По исходным данным рефлектограммы произвести измерения и расчет суммарных потерь в линии связи и оптимизировать волоконно-оптическую трассу.

Результаты и их обсуждение

Из базы данных программы «OTDR», прилагаемой к измерительному прибору FTB-200, были получены графики зависимости уровня сигнала от длины кабеля в реальных волоконно-оптических трассах, и для анализа была выбрана одна из рефлектограмм (рис. 1), содержащая 10 событий (в самом устройстве в блоке обработки электрического сигнала от измерительного преобразователя осуществлялись все виды автоматической обработки рефлектограмм и автоматических измерений).

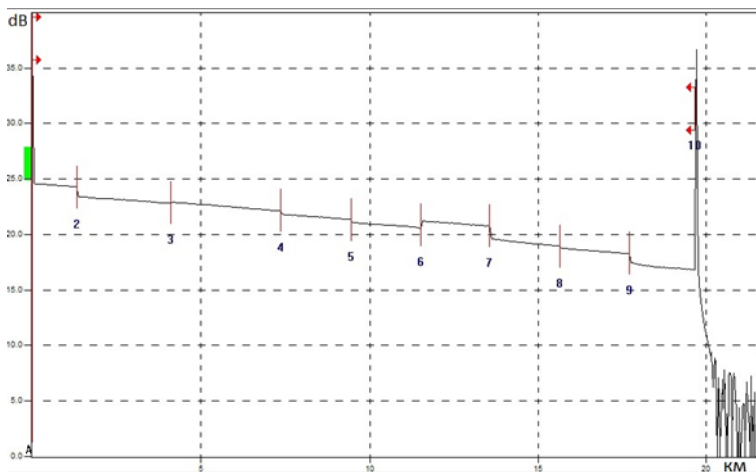


Рис. 1. Анализируемая рефлектограмма

Таблица 1. Таблица событий на трассе

№	Полож. (дБ)	Тип события	Измер. (дБ)	Потери (дБ)	Отраж. (дБ)	Затух. (дБ/км)	Накopl. (дБ)
1	0,000	Начальный уровень Уч. волокна (2,080 км)	0,000 0,572	0,012 0,361	-36,0*		0,000 0,572
2	2,080	Неотражающий дефект Уч. волокна (3,436 км)	0,000 0,690	0,097 0,589	а/св.	0,275	0,572 1,262
3	5,517	Неотражающий дефект Уч. волокна (5,323 км)	0,390 1,087	0,002 0,667	сплайс	0,201	1,652 2,739
4	10,840	Неотражающий дефект Уч. волокна (5,491 км)	0,123 1,139	0,191 0,579	п/а св.	0,204	2,862 4,001
5	16,331	Неотражающий дефект Уч. волокна (5,037км)	0,211 1,031	0,244 0,460	сплайс	0,207	4,212 5,243
6	21,368	Неотражающий дефект Уч. волокна (3,737 км)	0,355 0,794	0,276 0,386	сплайс	0,205	5,598 6,392
7	25,106	Неотражающий дефект Уч. волокна (5,532 км)	0,295 1,101	0,155 0,911	сплайс	0,212	6,687 7,788
8	30,638	Неотражающий дефект Уч. волокна (2,993 км)	0,181 0,587	0,138 0,449	п/а св.	0,199	7,969 8,556
9	33,631	Неотражающий дефект Уч. волокна (5,333 км)	0,145 1,103	0,449 0,621	п/а св.	0,196	8,701 9,804
10	38,964	Отражающий конец	0,000	0,002	> -16,6*	0,207	9,804

Для сравнения реально возможных и полученных прибором потерь в линии связи были произведены дополнительные измерения затухания на различных событиях в программе “ShellFTB” (табл. 1).

В табл. 1 показаны все события (дефекты), присутствующие в линии связи, а также их точное местоположение и количество световых потерь на конкретном событии.

Для расчета суммарных измеренных потерь на трассе была использована следующая формула и методика расчета, приведенная в работе [4]:

$$\sum_{i=1}^n L_i \alpha_i + n_1 A_1 + n_2 A_2 + n_3 A_3 + n_4 A_4 + n_5 A_5 + Z \leq \mathcal{E}, \quad (1)$$

где L_i – длина i -того участка оптоволокна; α_i – коэффициент затухания на i -м участке оптоволокна; n_i – количество соединений/переключателей/изгибов в тракте; A_i – затухание в соединениях; Z – энергетический запас, расходуемый в процессе эксплуатации ВОЛС на старение элементов, новые разъёмные и неразъёмные соединения, во время ремонта; \mathcal{E} – энергетический потенциал аппаратуры, численно равный оптическому бюджету системы, то есть допустимое затухание оптического сигнала в данной системе.

Для заданной рефлектограммы суммарные потери на трассе оказались меньше расчетного значения энергетического потенциала, что говорит о том, что неравенство выполнено, трассу можно вводить в эксплуатацию:

$$0 + 1,251 + 0,449 + 0 + 8,104 + 3 = 12,804 \leq 14,196 \text{ дБ.}$$

В данной статье не приводится поэтапный расчет каждого слагаемого (отдельных потерь на каждом событии рефлектограммы, энергетического потенциала аппаратуры), так как он является достаточно объемным.

На основе полученных данных и проведенного анализа было дано схематическое изображение трассы, произведен расчет потерь на всех событиях в линии в прямом направлении, которые с учетом энергетического запаса (3дБ) составили около 13 дБ при длине трассы почти в 40 км.

Выводы

Было произведено сравнение измеренных прибором данных с результатами самостоятельных измерений в программе ShellFTB, на основе которого посредством корректировки и расчета суммарных потерь и оптического бюджета линии связи будут даны рекомендации для дальнейшей оптимизации волоконно-оптической трассы.

По теоретическим расчетам после измерения потерь в программе можно заключить, что данная трасса находится в хорошем состоянии, пригодна для дальнейшей эксплуатации. Несмотря на то, что все события на трассе были сравнены с оптимальными значениями, использу-

мыми на длине волны 1310 нм, можно сделать вывод, что эта трасса может служить эталоном для сравнения с другими трассами. То есть величины потерь для длины волны 1550 нм при измерении будут несколько меньше, чем величины потерь на длине волны 1310 нм, это говорит о том, что данная волоконно-оптическая трасса имеет хорошие параметры. Все события на трассе, включая прямые участки, по потерям соответствуют норме, что говорит о качестве и долговечности данной волоконно-оптической трассы.

Список использованных источников и литературы

1. *Битнер, В. И.* Нормирование качества телекоммуникационных услуг: учеб. пособие для вузов / В. И. Битнер, Г. Н. Попов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2004. – 312 с.
2. Измерение параметров волоконно-оптических линейных трактов : учеб. пособие / М. С. Былина, С. Ф. Глаголев, Л. Н. Кочановский, В. В. Пискунов. – Санкт-Петербург : СПб ГУТ, 2002. – 68 с.
3. Измерения на ВОЛП методом обратного рассеяния : учеб. пособие для ВУЗов / В. А. Андреев, В. А. Бурдин, В. С. Баскаков, А. Л. Косова – Самара : СРТТЦ ПГАТИ, 2000. – 107 с. : ил.
4. Технология волоконной оптики : метод. указ. по выполн. лаб. раб. / Я. Э. Садовникова, В. С. Борновицкая. – Москва : РТУ МИРЭА, 2021. – Электрон. опт. диск (ISO).

Ya. E. Sadovnikova^{1,2, ✉^a}, CSc in engineering, associate professor

A. V. Oficerova^{1, ✉^b}, student

E-mail: ^a yanasadovnikova@gmail.com, ^b anna270702@mail.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² MIREA – Russian University of Technology, Moscow

Estimation of Losses in a Fiber-Optic Path with Local Defects Based on the Analysis of a Given Reflectogram

According to a given reflectogram of a linear fiber-optic route, various types of events were identified, local defects were analyzed, their location on the route, the amount of losses and reflectivity. Based on the analysis, a schematic representation of the route was given and its optimization was performed.

Keywords: reflectogram, fiber optic, optical fiber, communication.

УДК: 538.958:537.226.1:544.2(045)

В. Вал. Соболев^{✉^a}, д-р физ.-мат. наук, проф.

Л. И. Жданова^{✉^b}, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: ^a Soboleff.val@yandex.ru, ^b lizlizhd@mail.ru

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

Параметры сложной структуры оптических функций твердых CO₂ и CO

В работе определены два варианта спектров шестнадцати фундаментальных оптических функций твердого CO₂ в области энергии 9–29 эВ при 30 К (расчет по спектру $\varepsilon_2(E)$), в области 9–26 эВ при 6 К (расчет по спектру $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$), спектры шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций твердого CO в области энергии 7,5–9,5 эВ при 20,4 К, рассчитанных по спектрам ε_1 и ε_2 , полученных по экспериментальным данным спектров отражения и поглощения. Установлены их основные особенности и общие закономерности. Расчеты выполнены с помощью компьютерных программ, созданных на основе соотношений Крамерса – Кронига и известных аналитических формул связи между оптическими функциями. Спектры $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ криодиэлектрика CO₂ были разложены на 19 (расчет по ε_2) и 21 (расчет по $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$) элементарных компонент полос переходов с установлением их основных параметров (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i) усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда вместо 14 максимумов и ступенек экспериментальных спектров. При разложении спектров $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ твердого CO на элементарные компоненты усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда вместо 10 полос экспериментальных спектров было установлено 29 весьма узких и малоинтенсивных элементарных полос переходов с определением их основных параметров.

Ключевые слова: твердые CO₂ и CO, оптическая функция, междузонный переход, экситон, диэлектрическая проницаемость, соотношения Крамерса – Кронига, усовершенствованный метод объединенных диаграмм Арганда.

Введение

При нормальных условиях CO₂ и CO находятся в газообразном состоянии и только при очень низких температурах переходят в кристаллическое состояние. Их называют поэтому криокристаллами или криогенными кристаллами. Тонкие пленки этих криокристаллов обычно получают путем осаждения на холодные подложки из газообразного

состояния. Для этих молекулярных кристаллов характерны слабость сил межмолекулярных взаимодействий и большие величины энергий экситонных переходов [1, 2]. CO_2 и CO кристаллизуются в кубической решетке пространственной группы $\text{Pa}\bar{3}$ с 4 молекулами в элементарной ячейке [3]. Параметры решеток CO_2 , CO весьма близки ($a \approx 0,56$ нм). Кристаллы CO_2 и CO являются классическими моделями молекулярных кристаллов. Оба указанных материала находят широкое применение.

Ширина запрещенной зоны CO_2 составляет $\sim 10,0$ эВ, а $\text{CO} \sim 7,8$ эВ. Разрешенные оптические переходы этих материалов расположены в области энергии $E > 10$ и $7,8$ эВ соответственно. Поэтому их оптические спектры исследованы сравнительно слабо. Для них известны лишь единичные измерения спектров отражения, характеристических потерь, диэлектрической проницаемости. Таким образом, весьма актуальной является задача получения новой обширной количественной информации об оптических свойствах, параметрах полос переходов твердых CO_2 и CO .

Методика расчетов

В широкой области энергий, как правило, экспериментально определяется только спектр отражения $R(E)$ при почти нормальном падении света на образец. В некоторых случаях, применяя весьма сложные приближенные методики, можно измерить также интегральную функцию характеристических потерь электронов $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$. Кроме того, в области $E < 5,5$ эВ эллипсометрическими методами измеряют спектры $\varepsilon_1(E)$ и $\varepsilon_2(E)$. Исходя из сказанного, полный комплекс фундаментальных оптических функций обычно рассчитывают на основе экспериментального спектра отражения по специальным компьютерным программам с использованием интегральных соотношений Крамерса – Кронига и методов экстраполяции функции $R(E)$ в неизмеренные области, а также известных аналитических формул связи оптических функций между собой.

Полосы оптических переходов твердых тел в широкой области энергий экспериментальных спектров, как правило, сильно перекрываются. В результате многие из них структурно не наблюдаются на интегральной кривой переходов в спектрах поперечной ε_2 и продольной $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$ функций. 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) составляет одну из фундаментальных проблем спектроскопии. Математически задача разложения интегральной кривой на элементарные составляющие считается некорректной, имеющей бесконечное множество решений с различными наборами параметров пе-

реходов. Тем не менее из-за важности проблемы уже десятки лет известно большое количество работ, посвященных ее решению методом воспроизведения спектров отражения или диэлектрической проницаемости с большим количеством подгоночных параметров и возможных моделей полос переходов [4]. Форму контура изолированной полосы в большинстве работ выбирают в виде лоренциана с тремя параметрами: энергией максимума E_i , полушириной H_i и интенсивностью I_i . В нашей работе для разложения спектров $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ на элементарные компоненты применялся беспараметрический усовершенствованный метод объединенных диаграмм Арганда [4]. Данный метод позволил убрать у выделенных элементарных полос переходов с контуром лоренциана лишние физического смысла «хвосты», занижающие интенсивность, и корректно определить силы осцилляторов для поперечных полос. Используемые нами методики расчетов подробно изложены и многократно применялись [5–7].

Результаты расчетов и их обсуждение

Экспериментальные спектры $\varepsilon_2(E)$ тонких пленок CO_2 получены в области 9–29 эВ при 30 К [8], а спектры характеристических потерь электронов $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ – в области 9–26 эВ при 6 К [9]. На основе этих экспериментальных спектров нами были рассчитаны два варианта спектров полного комплекса шестнадцати фундаментальных оптических функций твердого криодиэлектрика CO_2 (рис. 1, 2). Спектры оптических функций обоих вариантов расчетов содержат 14 максимумов и ступенек. По энергии структур данные обоих вариантов расчетов хорошо согласуются.

Далее спектры $\varepsilon_2(E)$ (первый вариант расчетов) и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ (второй вариант расчетов) были разложены на элементарные компоненты усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда с определением полного набора наиболее интенсивных переходов и их основных параметров (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i). В разложенных спектрах $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ установлено 19 (вариант № 1, по ε_2) и 21 компонента (вариант № 2, по $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$) (табл. 1, 2). Максимумы полос возбуждения объемных плазмонов расположены при $E_{pv} = 21,3$ (вариант № 1), 22,6 эВ (вариант № 2), а полос поверхностных плазмонов при $E_{ps} = 21,0$ и 21,7 эВ соответственно. Различия по энергии для двух вариантов расчетов на $\Delta E \approx 1,3$ эВ обусловлены, очевидно, слабым разрешением экспериментальных спектров характеристических потерь электронов ($\Delta E \approx 0,8$ эВ) и большой полушириной полос плазмонов ($H \approx 2\text{--}3$ эВ). На основе анализа спек-

тров фотоэмиссии и теоретических расчетов уровней газообразного CO_2 в работе [8] предположено, что полосы твердого CO_2 обусловлены экситонами в области 9–16 эВ и междузонными переходами в области больших энергий.

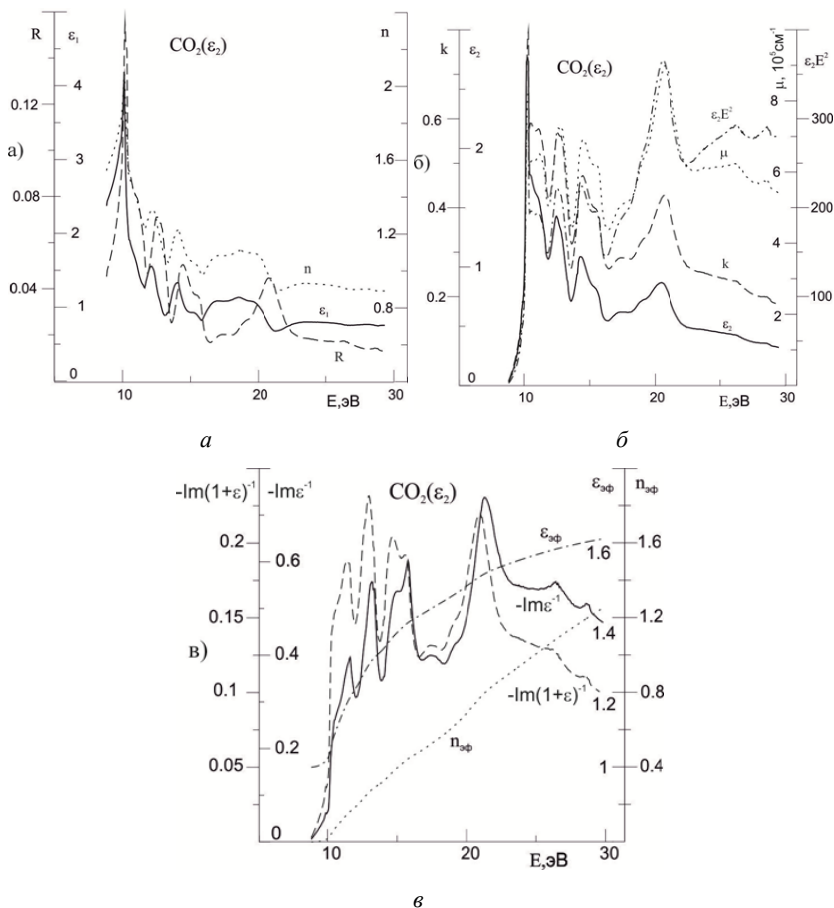


Рис. 1. Экспериментальный спектр ϵ_2 и расчетные спектры R, n, ϵ_1 (а); $k, \mu, E^2\epsilon_2$ (б); $-\text{Im}\epsilon^{-1}, -\text{Im}(1+\epsilon)^{-1}, n_{\text{эф}}, \epsilon_{\text{эф}}$ (в) твердого CO_2

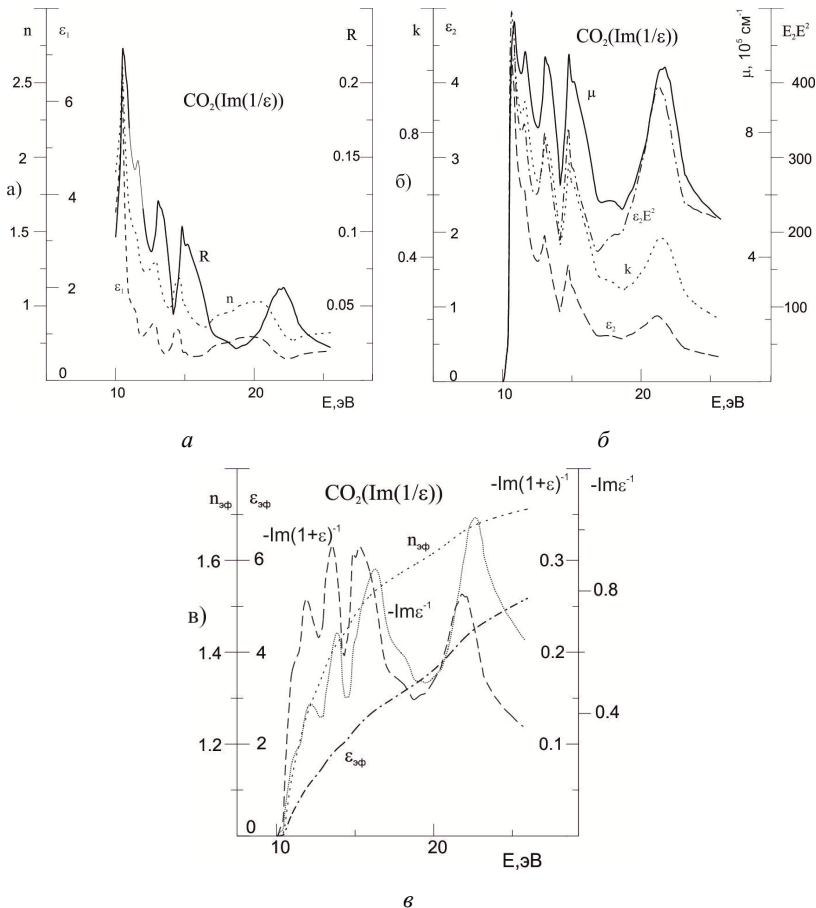


Рис. 2. Экспериментальный спектр $-\text{Im} \epsilon^{-1}$ и расчетные спектры R, n, ϵ_1 (а); $k, \epsilon_2, \mu, E^2 \epsilon_2$ (б); $-\text{Im}(1+\epsilon)^{-1}, n_{\text{эф}}, \epsilon_{\text{эф}}$ (в) твердого CO_2

Таблица 1. Параметры компонент разложений спектров ϵ_2 и $-\text{Im} \epsilon^{-1}$ твердого CO_2 , рассчитанных на основе ϵ_2 (вариант № 1)

№	E_i		H_i		f_i		I_i		S_i	
	ϵ_2	$-\text{Im} \epsilon^{-1}$	ϵ_2	$-\text{Im} \epsilon^{-1}$	ϵ_2	ϵ_2	$-\text{Im} \epsilon^{-1}$	ϵ_2	$-\text{Im} \epsilon^{-1}$	
1	10,18	—	0,18	—	0,024	1,18	—	0,33	—	
2	10,28	—	0,19	—	0,022	1,15	—	0,34	—	
3	10,58	10,63	0,77	0,82	0,11	0,99	0,24	1,18	0,31	
4	11,1	11,6	1,3	1,0	0,22	1,15	0,25	2,23	0,36	

Окончание табл. 1

№	E_i		H_i		f_i		I_i		S_i	
	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	
5	12,4	–	1,2	–	0,23	1,12	–	2,01	–	
6	12,93	13,13	0,49	1,7	0,037	0,42	0,50	0,32	1,27	
7	14,3	15,0	1,5	1,2	0,33	0,96	0,44	2,12	0,82	
8	15,5	15,78	1,4	0,68	0,20	0,49	0,37	1,03	0,39	
9	17,3	17,4	1,9	1,9	0,52	0,59	0,40	1,68	1,14	
10	19,3	19,4	1,7	1,6	0,39	0,51	0,26	1,32	0,64	
11	20,5	–	1,4	–	0,38	0,74	–	1,57	–	
12	–	21,3	–	2,0	–	–	0,68	–	2,03	
13	22,4	22,38	1,4	0,88	0,43	0,48	0,21	1,04	0,29	
14	23,9	23,6	1,3	1,7	0,43	0,45	0,43	0,91	1,11	
15	–	24,43	–	0,58	–	–	0,21	–	0,19	
16	–	25,2	–	1,4	–	–	0,38	–	0,80	
17	26,2	26,4	1,5	1,2	0,60	0,47	0,37	1,08	0,72	
18	–	27,4	–	1,5	–	–	0,36	–	0,84	
19	28,2	28,6	1,5	1,2	0,64	0,40	0,37	0,90	0,66	

Таблица 2. Параметры компонент разложений спектров ε_2 и $-\text{Im}\varepsilon^{-1}$ твердого CO_2 , рассчитанных на основе $-\text{Im}\varepsilon^{-1}$ (вариант № 2)

№	E_i		H_i		f_i		I_i		S_i	
	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	
1	10,52	–	0,10	–	0,26	2,16	–	0,34	–	
2	10,64	–	0,22	–	0,42	4,02	–	1,41	–	
3	10,85	–	0,19	–	0,10	2,35	–	0,71	–	
4	11,02	–	0,22	–	0,079	2,15	–	0,73	–	
5	11,19	–	0,21	–	0,055	1,85	–	0,61	–	
6	11,37	11,3	0,21	1,2	0,047	1,80	0,14	0,60	0,26	
7	11,58	–	0,22	–	0,042	1,82	–	0,62	–	
8	11,77	–	0,21	–	0,031	1,52	–	0,51	–	
9	12,12	12,2	0,29	1,3	0,033	1,39	0,36	0,62	0,73	
10	13,1	13,8	1,2	1,7	0,15	1,89	0,51	3,47	1,30	
11	14,70	–	0,64	–	0,033	0,99	–	0,98	–	
12	15,3	15,1	1,1	1,1	0,039	0,70	0,21	1,22	0,34	
13	16,2	16,3	1,4	1,7	0,037	0,57	0,79	1,22	2,02	
14	17,8	17,8	1,5	1,6	0,039	0,57	0,41	1,33	0,98	
15	19,6	19,2	1,2	1,4	0,023	0,44	0,26	0,82	0,54	
16	–	20,1	–	1,4	–	–	0,22	–	0,45	
17	21,2	–	2,0	–	0,068	0,84	–	2,54	–	
18	22,6	22,6	1,3	2,9	0,020	0,38	0,99	0,79	4,33	
19	24,8	25,4	1,8	2,5	0,028	0,42	0,39	1,12	1,49	
20	–	36,3	–	2,9	–	–	0,16	–	0,73	
21	27,7	27,0	2,2	1,5	0,029	0,33	0,24	1,13	0,55	

В работе [10] измерены спектры отражения и пропускания пленок CO при 20,4 К, а далее по этим данным были рассчитаны спектры ε_1 и ε_2 в области 7,5–9,5 эВ. На основе спектров $\varepsilon_1(E)$ и $\varepsilon_2(E)$ работы [10] нами были получены спектры остальных оптических функций из их полного комплекса (рис. 3). В рассчитанных спектрах всех оптических функций наблюдается 10 полос с дублетной или триплетной тонкой структурой. По энергии максимумов двух групп оптических функций – R , n , ε_1 и ε_2 , k , μ , $E^2\varepsilon_2$ совпадают с высокой точностью со смещением ΔE между ними в интервале 0,02–0,07 эВ. Поперечные максимумы и их продольные аналоги в оптических функциях резонансно совпадают с точностью до 0,01 эВ.

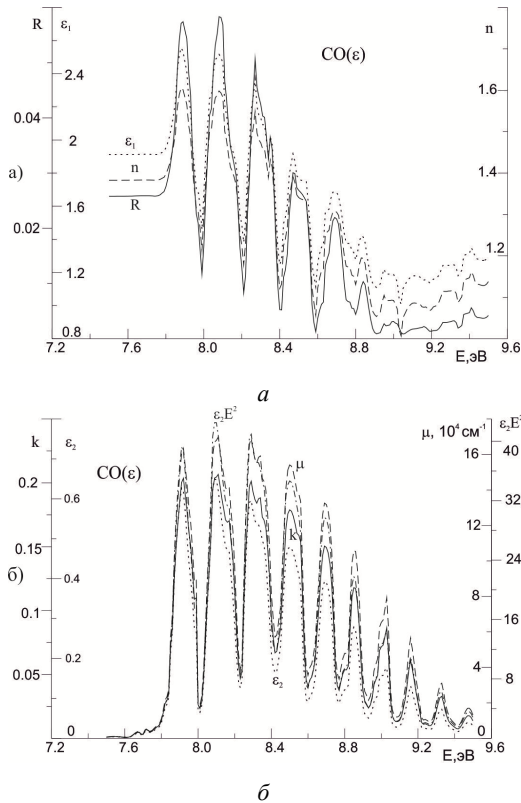
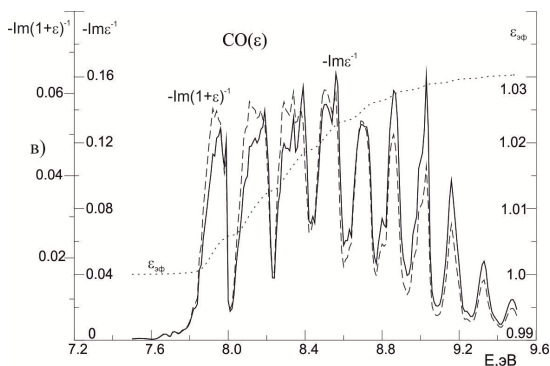


Рис. 3. Расчетные спектры твердого CO (расчет по ε_1 и ε_2):
 R , n , ε_1 (а); ε_2 , k , μ , $E^2\varepsilon_2$ (б)



6

Рис. 3 (окончание, начало на с. 304): $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$, $-\text{Im}(1 + \varepsilon)^{-1}$, $\varepsilon_{\text{эф}}(\varepsilon)$

Далее функции $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ были нами разложены на простые полосы переходов усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда, что позволило установить параметры элементарных переходов (табл. 3). Все 29 компонент, установленные в результате разложения, сравнительно узкие с полуширинами $H_i \approx 0,03\text{--}0,07$ эВ и слабые по интенсивности с площадями $S_i \approx 0,005\text{--}0,05$ эВ. Эти структуры твердого СО, очевидно, обусловлены электронно-колебательными переходами $A^2\Pi \rightarrow X^1\Sigma^+$.

Таблица 3. Параметры компонент разложений спектров ε_2 и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$ и отношения площадей $S(\varepsilon_2) / S(-\text{Im } \varepsilon^{-1})$ компонент твердого СО, рассчитанных на основе ε_2 , ε_1

№	E_i		H_i		I_i		S_i		$S(\varepsilon_2) / S(-\text{Im } \varepsilon^{-1})$
	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	
1	7,82	7,83	0,03	0,05	0,065	0,015	0,003	0,001	2,5
2	7,87	7,87	0,03	0,04	0,12	0,027	0,006	0,002	3,1
3	7,91	7,91	0,07	0,07	0,62	0,07	0,069	0,008	8,5
4	7,94	7,96	0,03	0,05	0,10	0,10	0,005	0,009	0,6
5	7,97	7,99	0,05	0,02	0,21	0,05	0,016	0,001	11,5
6	8,06	8,08	0,04	0,05	0,18	0,068	0,01	0,006	2,1
7	8,09	8,12	0,06	0,06	0,61	0,075	0,055	0,007	7,8
8	8,12	8,14	0,03	0,03	0,13	0,069	0,007	0,003	2,1
9	8,16	8,19	0,06	0,06	0,43	0,14	0,037	0,01	2,8
10	8,19	8,26	0,04	0,02	0,14	0,058	0,008	0,002	4,5
11	8,26	8,29	0,03	0,04	0,13	0,08	0,006	0,005	1,2

Окончание табл. 3

№	E_i		H_i		I_i		S_i		$S(\varepsilon_2) / S(-\text{Im } \varepsilon^{-1})$
	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	ε_2	$-\text{Im } \varepsilon^{-1}$	
12	8,29	8,33	0,05	0,07	0,55	0,12	0,047	0,01	3,5
13	8,36	8,39	0,07	0,04	0,46	0,12	0,05	0,008	6,8
14	8,50	8,49	0,08	0,08	0,47	0,13	0,06	0,016	3,9
15	8,55	8,56	0,04	0,06	0,27	0,13	0,018	0,01	1,5
16	8,62	8,63	0,04	0,04	0,09	0,02	0,006	0,001	4,1
17	8,67	–	0,03	–	0,10	–	0,006	–	–
18	8,69	8,69	0,07	0,08	0,38	0,13	0,04	0,016	2,7
19	8,73	8,73	0,03	0,04	0,12	0,05	0,006	0,004	1,7
20	8,80	8,80	0,03	0,04	0,11	0,057	0,005	0,004	1,4
21	8,85	8,86	0,05	0,07	0,28	0,15	0,02	0,017	1,4
22	8,97	8,97	0,04	0,04	0,095	0,068	0,006	0,004	1,3
23	9,00	9,00	0,03	0,03	0,12	0,09	0,005	0,004	1,3
24	9,03	9,03	0,04	0,03	0,16	0,15	0,01	0,007	1,3
25	9,08	9,08	0,02	0,04	0,025	0,02	0,001	0,001	0,7
26	9,16	9,16	0,06	0,05	0,13	0,098	0,01	0,008	1,3
27	9,25	9,23	0,02	0,04	0,02	0,015	0,001	0,001	0,8
28	9,33	9,33	0,05	0,06	0,07	0,048	0,005	0,005	1,1
29	9,47	9,48	0,08	0,05	0,037	0,02	0,005	0,002	2,3

Заключение

Впервые определены два варианта спектров шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций твердого криодиэлектрика CO_2 с установлением их основных особенностей и общих закономерностей в области энергии 9–29 эВ при 30 К (расчет по спектру $\varepsilon_2(E)$), в области энергии 9–26 эВ при 6 К (расчет по спектру $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$) вместо известного спектра ε_2 и спектра потерь. Спектры $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ были разложены на элементарные компоненты усовершенствованным методом объединенных диаграмм Арганда. Вместо 14 максимумов и ступенек экспериментальных спектров нами было установлено 19 (расчет по ε_2) и 21 (расчет по $-\text{Im } \varepsilon^{-1}$) элементарных полос переходов с установлением их основных параметров (энергий E_i максимума и полуширины H_i , площади S_i и силы осциллятора f_i).

Впервые определены спектры шестнадцати фундаментальных поперечных и продольных оптических функций твердого криодиэлектрика CO с установлением их основных особенностей и общих закономерностей в области энергии в области 7,5–9,5 эВ при 20,4 К вместо спектров ε_1 и ε_2 , рассчитанных по экспериментальным данным спектров отражения и поглощения. Спектры $\varepsilon_2(E)$ и $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ твердого CO были разложены на элементарные компоненты усовершенствованным методом

объединенных диаграмм Арганда. Вместо 10 полос экспериментальных спектров с дублетной или триплетной тонкой структурой нами было установлено 29 весьма узких и малоинтенсивных элементарных полос переходов с установлением их основных параметров. Предположительно, эти структуры твердого СО обусловлены электронно-колебательными переходами $A^2\Pi \rightarrow X^1\Sigma^+$.

Полученная обширная новая информация позволит количественно и детально анализировать теоретические расчеты зон и экситонов кристаллов СО₂ и СО, а также родственных им материалов в широкой области энергии.

Список использованных источников и литературы

1. Кристаллы / под ред. Б. И. Веркина, А. Ф. Прихотько. – Киев : Наук. думка, 1983. – 526 с.
2. *Соболев, В. В.* Зоны и экситоны кристаллов. – Кишинев : Штиинца, 1986. – 206 с.
3. *Hobbs, J.* Ice physics. – Oxford : Univ. Press, 1974. – 267 p.
4. *Соболев, В. В.* Оптические свойства и электронная структура неметаллов. II. Моделирование интегральных спектров элементарными полосами. – Москва ; Ижевск : Ин-т компьютерных исслед., 2012. – 415 с.
5. *Соболев, В. В.* Оптические свойства и электронная структура неметаллов. I. Введение в теорию. – Москва ; Ижевск : Ин-т компьютерных исслед., 2012. – 583 с.
6. *Мерзляков, Д. А.* Аморфные и микрокристаллические полупроводники : сб. тр. X Междунар. конф. / Д. А. Мерзляков, В. В. Соболев, В. Вал. Соболев. – С.-Петербург : Изд-во Политех. ун-та, 2016. – 364 с.
7. Химическая физика и мезоскопия / А. И. Калугин, Е. А. Антонов, Д. А. Перевошиков, В. Вал. Соболев. – 2019. – Т.21, №. 4. – С. 604–610.
8. *Fock, J.-H.* Electronic band structure of solid CO₂ / J.-H. Fock, H.-J. Lan, E. E. Koch // DFSY S R-83-10. – 35 p.
9. *Daniels, J.* Optical constants of the solid N₂, O₂, CO₂ // Optics Commun. – 1970. – Vol. 2, no. 7. – Pp. 352-356.
10. *Scharber, S. R.* Optical constants of CO / S. R. Scharber, S. E. Weber // J. Chem. Phys. – 1971. – Vol. 55, no. 8. – Pp. 3977-3984.


V. Val. Sobolev ^{✉ a}, DSc in phys. and math., professor
L. I. Zhdanova ^{✉ b}, CSc in engineering, associate professor
E-mail: ^a Soboleff.val@yandex.ru, ^b lizlizhd@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Parameters of the Complex Structure of the Optical Functions of Solid CO₂ and CO

Two variants of the spectra of sixteen fundamental optical functions of solid CO₂ in the energy range of 9–29 eV at 30 K (calculated from the spectrum of $\varepsilon_2(E)$), in the range of 9–26 eV at 6 K (calculated from the spectrum $\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$), the spectra of sixteen fundamental transverse and longitudinal optical functions of solid CO in the energy range 7.5–9.5 eV at 20.4 K, calculated from the spectra ε_1 and ε_2 obtained from experimental data of the reflection and absorption spectra. Their main features and general patterns have been established. The calculations were performed using computer programs based on the Kramers-Kronig ratios and well-known analytical formulas for the connection between optical functions. The spectra of $\varepsilon_2(E)$ and $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ of the CO₂ cryodielectric were decomposed into 19 (calculated by ε_2) and 21 (calculated by $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$) elementary components of the transition bands with the establishment of their main parameters (maximum energies E_i and half-width H_i , area S_i and oscillator strength f_i) an improved method of combined Argand diagrams instead of 14 maxima and steps of experimental spectra. When decomposing the spectra of $\varepsilon_2(E)$ and $-\text{Im } \varepsilon^{-1}(E)$ of solid CO into elementary components by the improved method of combined Argand diagrams, instead of 10 bands of experimental spectra, 29 very narrow and low-intensity elementary transition bands were established with the determination of their main parameters.

Keywords: solid CO₂ and CO, optical function, interband transition, exciton, dielectric constant, Kramers-Kronig correlations, improved method of combined Argand diagrams.

УДК 616-74

*Д. А. Трефилов*¹ , студент
Д. Г. Калюжный^{1,2}, канд. техн. наук, доц.
E-mail: Dimkatref@yandex.ru

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

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

Прибор для низкоинтенсивной лазерной терапии

Разработан прибор для низкоинтенсивной лазерной терапии. Выбран сканирующий механизм в качестве передающей системы лазерного излучения для получения большей эффективности. Также предложено добавить переключатель лазеров для универсальности прибора.

Ключевые слова: лазер, система формирования пучка, медицина, лазерная терапия, система сканирования.

Введение

Механизм действия низкоинтенсивного лазерного излучения заключается в том, что световая волна поглощается клеточными фотодцепторами и запускает ряд метаболических изменений внутри клетки. Использование нескольких источников света с разной длиной волны может представлять терапевтическое преимущество, так как обеспечивает суммацию энергетического воздействия и проникновение на всю толщину ткани за счет использования излучения с разной длиной волны.

Приборы для низкоинтенсивной лазерной терапии (НИЛТ) применяются для смягчения и лечения различных заболеваний и травматических повреждений. Монохроматический и когерентный свет, создаваемый лазерами, используется для стимуляции заживления и регенерации, однако пока еще не достигнут консенсус касательно строгих параметров при лечении и профилактике различных патологий.

Цель: разработать прибор для низкоинтенсивной лазерной терапии, который будет иметь большую универсальность по сравнению с его аналогами, а также увеличение его эффективности.

Сведения из теории

Аргоновый лазер (длина волны 488 и 514 нм) применяется для абсорбирования меланина и гемоглобина, поэтому при его использовании в хирургии достигается гемостаз [1, 2].

Для лечения сосудистых заболеваний наиболее эффективными оказались импульсные лазеры с микросекундной длительностью и длинами волн в желтом спектре, так как глубина проникновения в желтом спектре составляет 65–125 мкм [3, 4].

He-Ne-лазер (гелий-неоновый, длина волны 610–630 нм), излучение которого хорошо проникает в ткани, имеет фотостимулирующий эффект, вследствие чего данный вид лазера нашел свое применение в физиотерапии.

Приборы для низкоинтенсивной лазерной терапии на выходе имеют широкий, равномерно распределенный пучок малой плотностью мощности, из-за чего время терапии может сильно увеличиваться. Данная разработка может увеличить эффективность приборов за счет использования нескольких источников излучения, а также уменьшить время терапии из-за большей плотности мощности по сравнению с его аналогами [5].

Также стоит учесть, что в соответствии с ГОСТ 31581–2012 [6] мощность лазерных источников не будет превышать:

- для 488 нм: 0,4 мВт;
- для 125 нм: 0,2 мВт;
- для 610 нм: 0,4 мВт.

Решение задачи

Метод: в данной работе представлена схема прибора для низкоинтенсивной лазерной терапии.

Рассмотрим функциональную схему прибора для лазерной терапии (рис. 1). Блок питания дает электроэнергию системе управления и источнику излучения. Система управления контролирует работу источника излучения. Выбранный оператором лазер генерирует излучение в систему формирования пучка. Система формирования пучка обеспечивает требуемые характеристики излучения на объекте воздействия (ширина пучка, однородность).

Принцип работы сканирующей системы заключается в следующем: на пластинку крепятся 4 катушки, причем на середине такой пластинки будет конус, на который кладется диаманетик с зеркалом посередине и с 4 магнитами, которые в свою очередь находятся над катушками. При подаче напряжения на катушки верхний диаманетик будет отклоняться в необходимую нам сторону. Таким образом, получено качающееся зеркало, на которое будет падать лазерный пучок.



Рис. 1. Функциональная схема лазерной установки

Система управления будет управлять наклоном зеркала в нужной плоскости за счет подачи напряжения на катушки.

Система формирования лазерного пучка формирует на объекте пучок малым диаметром, затем с помощью качающегося зеркала в двух плоскостях будет формироваться облучаемая площадь на объекте воздействия.

Также на разработанном устройстве будет переключатель, с помощью которого оператор может переключаться между лазерами с разными длинами волн.

На рис. 2 представлена схема сканирующей системы.

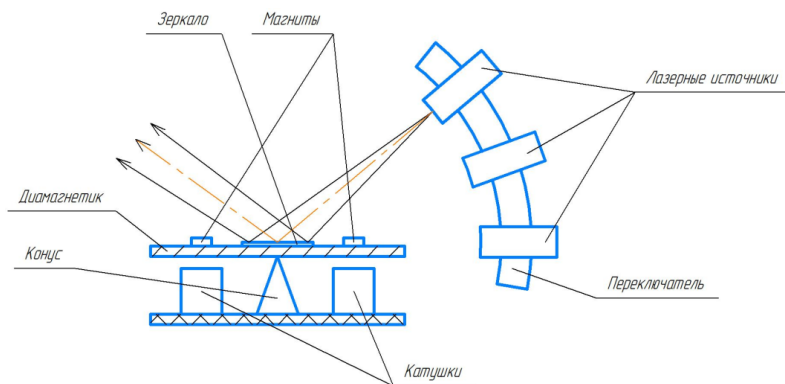


Рис. 2. Схема сканирующей системы

В таблице приведены основные характеристики разработанного прибора.

Таблица 1. Технические характеристики

Класс опасности лазерного излучения	1 Класс
Мощность, кВт	0,2–0,4 (в зависимости от длины волны)
Длина волны, нм	125, 488, 610
Габариты, мм	300×150×200
Вес, кг	3

Выводы

Разработана система сканирования для низкоинтенсивной лазерной терапии, применение которой позволит уменьшить время, затрачиваемое на терапию, за счет увеличения плотности мощности лазерного пучка. В разработанный прибор также был добавлен переключатель, который делает прибор универсальным в лечении различных заболеваний. Данный прибор будет иметь возможность задать необходимую область воздействия системой управления, переключения между тремя лазерными источниками с длинами волн, имеющими соответствующую мощность.

Список использованных источников и литературы

1. Опыт клинического применения диодного лазера на этапах стоматологического лечения / В. И. Шемонаев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13345> (дата обращения: 01.04.2018).
2. Лазерные технологии в терапевтической и ортодонтической стоматологической практике (обзор литературы) / А. В. Гуськов [и др.] // Научный альманах. – 2015. – № 9 (11). – С. 945–949.
3. Ключарева, С. В. Выбор лазерного аппарата для лечения сосудистых дефектов кожи / С. В. Ключарева, И. В. Пономарев // Вестник эстетической медицины. – 2004. – Т. 1, № 4. – С. 22–28.
4. A comparison of copper vapor and flashlamp pumped dye lasers in the treatment of facial telangiectasia / M. Waner [et al.] // J. Dermatol. Surg. Oncol. – 1993. – Vol. 19, issue 11. – Pp. 992–998.
5. Тарковский, В. В. Активная среда лазера на красителях на основе 3-бензимидазолила-7-юлолидина-2-иминокумарина перхлората для применения в селективной лазерной медицине / В. В. Тарковский, С. С. Ануфрик // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 2. Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2020. – Т. 10, № 3. – С. 133–142. – EDN FGYPXU.

6. ГОСТ 31581–2012. Лазерная безопасность. Общие требования при разработке и эксплуатации лазерных изделий. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по технологическому регулированию и метрологии от 1 ноября 2012 г. № 664-ст: введен впервые: дата введения 2015-01-01/ разработан ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении». – Москва : Стандартинформ, 2019.

*D. A. Trefilov*¹ ✉, student

D. G. Kalyuzhny^{1,2}, CSc in engineering, associate professor

E-mail: Dimkatref@yandex.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk

Low-Level Laser Therapy Device

A device for low-intensity laser therapy has been developed. A scanning mechanism was selected as the laser radiation transmitting system to obtain greater efficiency. It is also proposed to add a laser switch for the versatility of the device. A diagram of the developed device is presented.

Keywords: laser, beam formation system, medicine, laser therapy, air supply system.

УДК 66.021.2.065.5, 536.58

Д. И. Шарафетдинов [✉], магистрант
Б. Р. Буляков, магистрант
М. Т. Р. Заитов, аспирант, ассистент
Е. Н. Дулов, канд. физ.-мат. наук, доц.
Е. В. Воронина, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
E-mail: DISharafetdinov@mail.ru
Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Контроль процесса роста металлорганических кристаллов из раствора

Представлены результаты выращивания монокристаллов MAPbBr_3 из раствора в оригинальной лабораторной кристаллизационной установке с использованием нестандартного алгоритма контроля температурных профилей.

Ключевые слова: перовскиты, монокристаллы, регулятор температуры, кристаллизационная установка.

Введение

В настоящее время соединения с перовскитоподобной структурой активно изучаются из-за своих впечатляющих оптоэлектронных свойств. Изучение физико-химических основ синтеза таких материалов и способов их получения является актуальной задачей. Органо-неорганические галоидные перовскиты открывают новые возможности для детектирования ионизирующего излучения благодаря наличию атомов свинца в структуре, дефектоустойчивости, высокой подвижности и продолжительности жизни носителей заряда, а также простому способу получения таких кристаллов из раствора. Кристаллы металламмония бромид свинца MAPbBr_3 обладают примесной проводимостью, которую возможно компенсировать добавкой легирующей примеси в ростовой раствор. Это обеспечивает уменьшение шума и лучший сбор заряда, что позволяет получить спектр γ -излучения при комнатной температуре [1].

В настоящей работе представлены монокристаллы MAPbBr_3 , полученные путем кристаллизации из раствора с помощью оригинальной кристаллизационной установки, представленной на рис. 1.

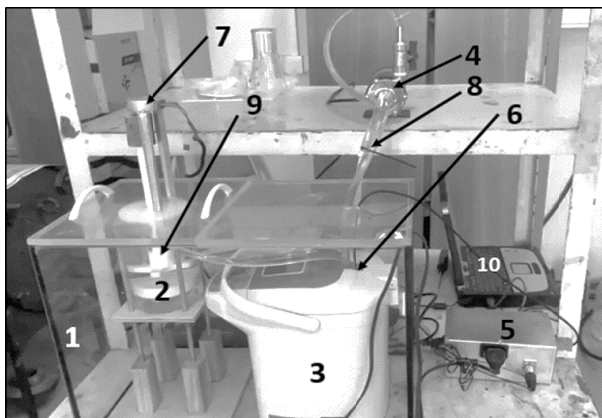


Рис. 1. Вид кристаллизационной установки

Постановка задачи

Согласно теории кристаллизации, рост кристаллов из растворов должен проводиться так, чтобы точка «состав-температура» двигалась в метастабильной области вдоль кривой насыщения раствора в сторону уменьшения растворимости. Существует множество влияющих факторов на процесс роста кристаллов: чистота раствора, скорость перемешивания раствора, температура. При соблюдении первых двух перечисленных условий для получения кристаллов с минимально возможным количеством дефектов основным является тщательный контроль температуры процесса. Типовые доступные ПИД-регуляторы не обеспечивают необходимый контроль заданного температурного профиля.

Решение задачи

Для оценки требований, предъявляемых к регулятору температуры, нами была составлена эквивалентная тепловая схема нашей установки, представленная на рис. 2.

Аналог электрической емкости – тепловая емкость. В данном случае это тепловые емкости двух веществ: воды в области с нагревательным элементом $C_{нэ}$ и ростового раствора $C_{р-ра}$. Сопротивление в эквивалентных тепловых схемах учитывает потери тепла в области с нагревательным элементом $R_{нэ}$ и области ростового сосуда $R_{р-ра}$ [2], а сопротивление $1/(G \cdot C_{нэ})$ зависит от скорости переноса массы G теплоносителя (кг/с) и теплоёмкости воды. Температура раствора $T_{вых}$ – регулируемая в эксперименте температура. $W(t)$ – зависящая от времени t , задаваемая регулятором выходная мощность.

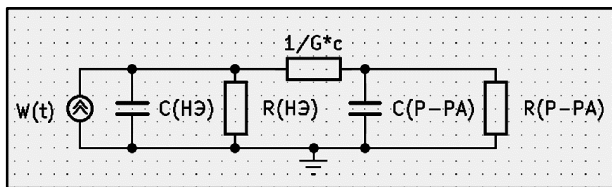


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема оригинальной установки

Система уравнений для данной эквивалентной тепловой схемы имеет вид:

$$C_{\text{нэ}} \frac{dT_{\text{нэ}}}{dt} + \frac{T_{\text{нэ}}}{R_{\text{нэ}}} + GC_{\text{нэ}} (T_{\text{нэ}} - T_{\text{вых}}) = W(t), \quad (1)$$

$$GC_{\text{нэ}} (T_{\text{нэ}} - T_{\text{вых}}) = C_{\text{р-ра}} \frac{dT_{\text{вых}}}{dt} + \frac{T_{\text{вых}}}{R_{\text{р-ра}}}. \quad (2)$$

Выразив $T_{\text{нэ}}$ из уравнения (2) и подставив в (1), эту систему можно привести к виду:

$$A \cdot \frac{d^2 T_{\text{вых}}}{dt^2} + B \cdot \frac{dT_{\text{вых}}}{dt} + C \cdot T_{\text{вых}} = W(t). \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что изменение температуры в ростовом сосуде кристаллизационной установки описывается дифференциальным уравнением второго порядка.

Представленные на рынке доступные модели не могли обеспечить одновременного контроля температуры с малой погрешностью, возможности отработки температурных профилей произвольной формы и их уникальной настройки. Поэтому был спроектирован и реализован оригинальный регулятор на базе платы Arduino Nano, благодаря чему появилась возможность обрабатывать заданные температурные профили с погрешностью до 0,5 градуса Цельсия.

Нагревание раствора в стакане с термостатирующей рубашкой 2 происходит путем подачи воды из емкости с нагревательным элементом 3 при помощи насоса 4 (рис. 1). Был выбран центробежный насос с магнитной муфтой, поскольку он рассчитан на длительное время работы и способен выдерживать температуры до 120 градусов. Стакан соединен с емкостью при помощи соединительных шлангов 8. Контроль температуры в емкости контролируется датчиком 6, информация с которого поступает в регулятор контроля температуры 5. Регулятор соединен с нагревательным элементом и контролирует его нагрев. Обработка ин-

формации с термодатчиков и задание температурных профилей осуществляется при помощи программы Arduino на персональном компьютере 10.

Важным этапом роста кристаллов является перемешивание раствора в ростовом сосуде, которое осуществляется с помощью фторопластовых лопастей, закреплённых на валу 9. Перемешивание раствора позволяет избежать возникновения градиента концентрации во время роста кристалла. Вращение осуществляется при помощи синхронного двигателя малой мощности 7. Элементы 2, 3, 8, 9 располагаются в стеклянном термостате со съёмной крышкой 1 для дополнительной термоизоляции установки. Двигатель малой мощности и вал закреплены на крышке внешнего термостата.

Результаты и их обсуждение

Целью первого выращивания было получение затравочных кристаллов MAPbBr_3 . Для этого раствор нагревался со скоростью $3\text{ }^\circ\text{C}$ в час с комнатной температуры до $68,5\text{ }^\circ\text{C}$. Во время повышения температуры начался процесс кристаллизации и образовались мелкие кристаллы. Далее значение температуры зафиксировалось и поддерживалось в течение трех часов. Полученные образцы с размерами $\sim 1\text{ мм}$ были извлечены для будущего их использования в качестве затравочных кристаллов. Выбрав в качестве затравок 3 кристалла, в течение четырёх суток по 10 часов выращивали их при поддержании температуры в области пересыщения раствора. Фотографии полученных кристаллов представлены на рис. 3.

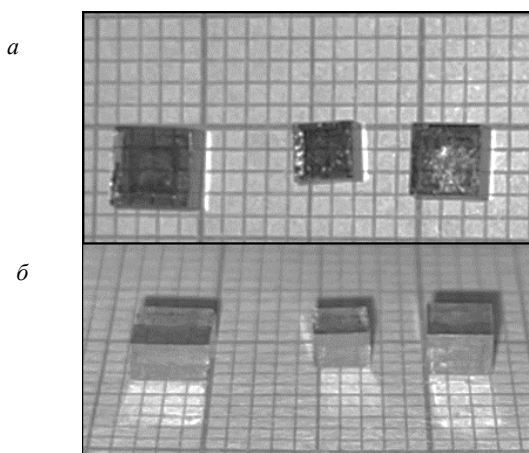


Рис. 3. Фотографии полученных кристаллов MAPbBr_3 :
a – вид сверху; *б* – вид сбоку

Для определения структуры и оценки качества полученных кристаллов были выполнены рентгеноструктурные исследования. Учитывая глубину проникновения рентгеновского излучения порядка десятка микрометров, последовательно исследовалась каждая грань кристалла. Результаты рентгеновской дифракции полностью согласуются с литературными данными [3] и показывают монокристалличность и однофазность синтезированных образцов MAPbBr_3 .

Следующим этапом исследования синтезированных образцов было исследование элементного состава методами рентгенофлуоресцентного анализа и Оже-спектроскопии. Оже-спектроскопия проводилась в трех зонах анализа для одного кристалла. Полученные спектры показали, что выращенные кристаллы MAPbBr_3 не содержат посторонних примесей.

Время выращивания кристаллов в установке составило 46 часов, что на порядок меньше, чем при использовании метода испарения растворителя. Реализованный способ задания и контроля конкретного температурного профиля позволил ускорить процесс роста кристаллов без потери их качества.

Выводы

В данной работе собрана (создана) оригинальная ростовая установка для кристаллизации металлорганических кристаллов из раствора. Разработан и реализован регулятор для контроля заданного температурного профиля в процессе роста. Выращены кристаллы MAPbBr_3 , показана их однофазность и монокристалличность.

Список использованных источников и литературы

1. *Haotong, W.* Dopant compensation in alloyed $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3\text{-xCl}_x$ perovskite single crystals for gamma-ray spectroscopy // *Nature Materials*. – 2017. – Vol. 16. – Pp. 826–833.
2. *Шкляев, С. Э.* Математическое моделирование технологических процессов / С. Э. Шкляев, Л. Н. Маркова // *Тяжелое машиностроение*. – 2009. – №. 8. – С. 20–23.
3. *Peng, W.* Solution-Grown Monocrystalline Hybrid Perovskite Films for Hole-Transporter-Free Solar Cells / W. Peng, W. Lingfei, M. Banavoth // *Advanced Materials*. – 2016. – Vol. 28. – Pp. 3383-3390.

D. I. Sharafetdinov [✉], master student

B. R. Bulyakob, master student

M. T. R. Zaitov, postgraduate student, assistant

E. N. Dulov, CSc in phys. and math., associate professor

E. V. Voronina, DSc in phys. and math., senior researcher

E-mail: DISharafetdinov@mail.ru


Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Control of the Process of Growth of Organometallic Crystals from Solution

The results of growing MAPbBr₃ single crystals from a solution in an original laboratory crystallization plant using a non-standard algorithm for controlling temperature profiles are presented.


Keywords: perovskites, single crystals, temperature controller, crystallization plant.

УДК 681.2.08

А. С. Юрков^{1,3} ^a, аспирант

*И. А. Селиванов*³, сотрудник

*В. Д. Юрков*², *И. А. Высоцкая*², студенты

М. А. Плетнев^{1, b}, д-р хим. наук, доц.

E-mail: ^a yurkovals@eriskip.com, ^b pletnev@list.ru

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

² Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», г. Москва

³ ООО «ЭРИС» г. Чайковский

Выбор нагревательного элемента циркониевого сенсора остаточного кислорода

Статья представляет собой исследование циркониевой ячейки, являющейся высокотемпературным керамическим датчиком. Описывается экспериментальное исследование, в котором была использована керамическая пробирка из диоксида циркония, покрытая платиновой суспензией. Были проведены испытания двух нагревателей, внешнего и внутреннего, и сняты значения выходных сигналов (напряжения). Результаты показывают, что внешний нагреватель более точно соответствует уравнению Нернста и рекомендуется для использования.

Ключевые слова: циркониевая ячейка, керамический датчик, внешний и внутренний нагреватель, уравнение Нернста.

Введение

Горение является одним из основных процессов, которые используются для получения энергии в различных отраслях промышленности, транспорта и бытового хозяйства. Однако, несмотря на его широкое применение, горение также является одной из основных причин загрязнения воздуха и негативного воздействия на окружающую среду. Экологический контроль процессов горения становится все более важным, поскольку необходимо уменьшить выбросы вредных веществ, таких как углекислый газ (CO_2), оксиды азота (NO_x) и твердые частицы, которые наносят серьезный ущерб природным экосистемам и здоровью людей.

Оптимизация параметров горения, таких как температура, скорость подачи топлива и расход воздуха, является одним из способов снижения

загрязнения воздуха. Это может быть достигнуто путем использования современных систем автоматического управления процессами горения и контроля, которые позволяют непрерывно отслеживать и регулировать эти параметры в режиме реального времени. Одним из способов контроля является циркониевая ячейка.

Сведения из теории

Циркониевая ячейка (трехмерная модель представлена на рис. 1) представляет собой высокотемпературный керамический датчик. Это электрохимический гальванический элемент, состоящий из двух электропроводящих, химически инертных одинаковых металлических электродов. Ячейка из диоксида циркония представляет собой своего рода твердый электролит, он покрыт снаружи (измерительный электрод) и внутри (электрод сравнения) тонким пористым слоем металла, обычно платины. При температурах выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ оксид циркония становится проводником ионов кислорода, что создает ЭДС между платиновыми электродами. Эта ЭДС зависит от разницы между парциальным давлением кислорода в измеряемом газе и кислородом в эталонном газе (при использовании окружающего воздуха с содержанием кислорода 20,94 %) [1].



Рис. 1. Трехмерная модель сенсора

Описание эксперимента

Для экспериментов за основу была взята керамика в виде пробирки (наперстка) из диоксида циркония, стабилизированного диоксидом иттрия. Был использован рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu EDX 7000 [2], с помощью которого был определен процентный состав керамики, указанный на рис. 2.

EDX Report

Report No.

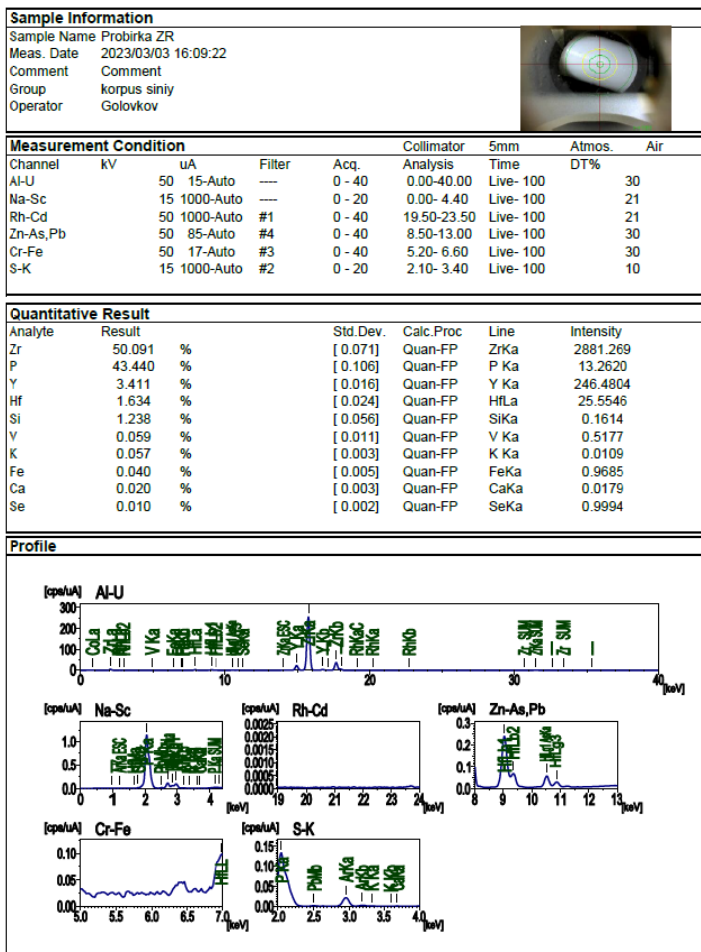


Рис. 2. Химический состав керамической пробирки

Затем внутреннюю и внешнюю поверхность пробирки покрыли платиновой суспензией, приготовленной по патенту RU 2023122683, и произвели сушку в муфельной печи (весь процесс описан в патенте), затем был собран сенсор со следующими конструктивными особенностями, указанными на рис. 3.

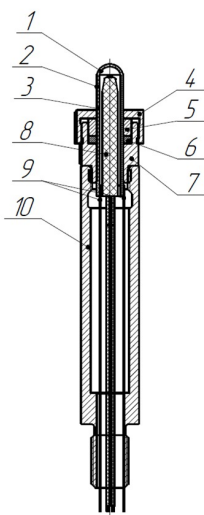


Рис. 3. Схематическое изображение сенсора: 1 – эталонный электрод; 2 – измерительный электрод; 3 – твердоэлектролитная ячейка из диоксида циркония; 4 – штуцер; 5 – уплотнительное кольцо; 6 – циркониевый порошок; 7 – гайка; 8 – термopара; 9 – токо-съемники; 10 – переходник для корпуса

После сборки сенсора был изготовлен керамический нагреватель, для поддержания постоянной температуры, пример представлен на рис. 4.

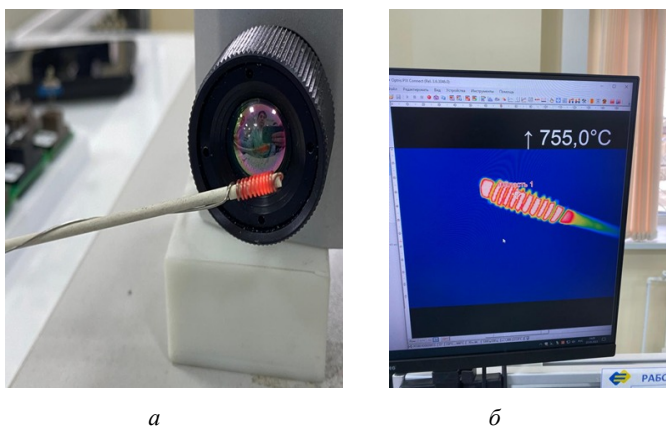


Рис. 4. Пример нагревателя: а – изготовленный из проволоки фехраль; б – снятая с нагревателя температура с помощью инфракрасной камеры Optiris

Также был собран стенд для снятия сигнала с ячейки, схематично изображенный на рис. 5.



Рис. 5. Принципиальная схема для испытаний

После сборки сенсора и стенда были проведены испытания двух нагревателей в сравнении, внешний нагреватель грел сенсор снаружи и был установлен вблизи платиновых электродов, а внутренний нагреватель был установлен внутри ячейки. С помощью регулируемого блока питания напряжение нагревателя было подобрано под оптимальные промышленные блоки питания на 24 В и 3,5 А, температура составила 700 °С, что является оптимальной для функционирования. Затем были сняты значения выходных сигналов (напряжения) (приведены на рис. 6) при подаче ГСО-ПГС с использованием эталона 1-го разряда, генератора разбавителя ГГС-Р зав № 224.

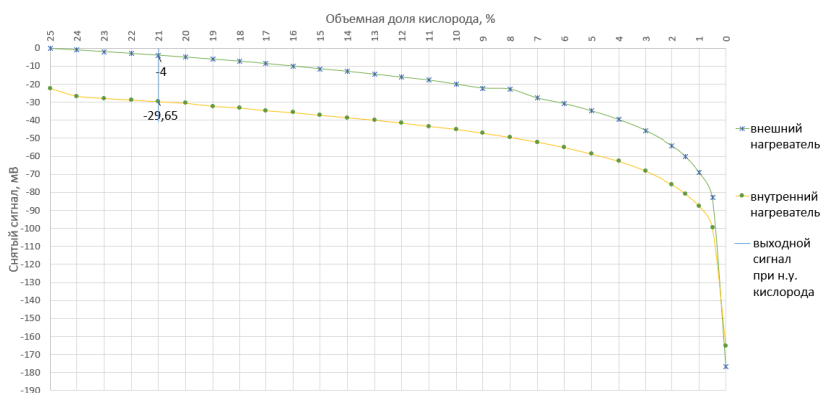


Рис. 6. Снятый сигнал с сенсора при подаче концентрации кислорода

Результаты и их обсуждения

Для сравнения полученных данных необходимо обратиться к уравнению Нернста (1) [3]:

$$E = \frac{RT}{nF} \log_e \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

где E – электродный потенциал; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К); T – абсолютная температура; F – постоянная Фарадея, равная 96485,33 Кл·моль⁻¹; n – число электронов, участвующих в процессе (4 в нашем случае); P_1 и P_2 – парциальные давления эталонного и контролируемого газа соответственно.

Упростим уравнение, подставив значения (2):

$$E = 0,0215T_{\ln} \frac{P_1}{P_2}, \quad (2)$$


где T – температура ячейки, $T = 700$ °С, следовательно, в условиях окружающего воздуха (21 % кислорода в окружающем воздухе) напряжение согласно уравнению Нернста должно быть равно 0 В.

Выводы

Из результатов следует, что внешний нагреватель более точно соответствует истинным значениям уравнения Нернста, имея отклонение всего лишь 4 мВ, в то время как внутренний нагреватель имеет смещение в –30 мВ. Выбор предпочтителен в пользу внешнего нагревателя.

Список использованных источников и литературы


1. Zirconia Oxygen Probe // ОxyPink. – URL: <https://oxypink.com/en/zirconia-oxygen-probe/> (дата обращения: 10.10.2023).
2. Энергодисперсионные рентгенофлуоресцентные спектрометры // Shimadzu Corporation. – URL: <https://www.shimadzu.ru/sites/shimadzu.seg/files/SMO/brochures/EDX-7000-8000-8100-c142e044b-RUS.pdf> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Уравнение Нернста. Потенциометрические методы анализа // НПП «СЕМИКО». – URL: <http://multitest.semico.ru/nernst.htm> (дата обращения: 10.10.2023).

A. S. Yurkov^{1,3} ^a, postgraduate student

*I. A. Selivanov*³, employee

*V. D. Yurkov*², student

*I. A. Vysotskaya*², student

M. A. Pletnev^{1, ^b}, DSc in chemical, associate professor

E-mail: ^a yurkovals@eriskip.com, ^b pletnev@list.ru

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

² National Research University Higher School of Economics, Moscow

³ ERIS LLC, Tchaikovsky

Selection of the Heating Element of the Zirconium Residual Oxygen Sensor

The article is a study of a zirconium cell, which is a high-temperature ceramic sensor. An experimental study is described in which a ceramic tube made of zirconium dioxide coated with a platinum suspension was used. Two heaters were tested - external and internal, and the values of the output signals (voltage) were removed. The results show that the external heater more accurately corresponds to the Nernst equation and is recommended for use.

Keywords: zirconium cell, ceramic sensor, external and internal heater, Nernst equation.

Электронное научное издание

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2023.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XIX Всероссийской научно-технической конференции
(Ижевск, 29 ноября – 1 декабря 2023 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:
http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2023.pdf

Дата размещения на сайте: 22.11.2024

Технический редактор: *С. В. Логинова*
Корректор: *И. В. Ганеева*
Верстка: *Н. В. Паклиной*
Дизайн обложки: *К. Н. Сабура*

Подписано к использованию 21.11.2024. Объем 16,8 МБ
Уч.-изд. л. 12,66. Заказ 202

Издательство управления информационных ресурсов
Ижевского государственного технического университета
имени М. Т. Калашникова. 426069, Ижевск, Студенческая, 7