

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова»

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2018.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической  
конференции  
(Ижевск, 12–14 декабря 2018 года)



Издательство ИжГТУ  
имени М. Т. Калашникова  
Ижевск 2018

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

*В. П. Грахов*, председатель организационного комитета, д-р экон. наук, ректор ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. В. Щенятский*, зам. председателя, д-р техн. наук, проф., проректор по научной и инновационной деятельности;

*А. В. Абилов*, 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;

*В. А. Алексеев*, д-р техн. наук, проф., ученый секретарь совета университета;

*Д. М. Маликова*, канд. экон. наук, доц., начальник управления научно-исследовательских работ;

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

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

*Л. В. Волкова*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»;

*Б. И. Сибгатуллин*, ст. преподаватель кафедры «Электротехника»;

*А. П. Александров*, гл. конструктор АО «ИЭМЗ «Купол»;

*А. Б. Бобков*, тех. директор филиала ПАО «Мобильные телесистемы»;

*С. Б. Николитчев*, зам. директора по развитию ООО «ИИКП» (Корпорация «Аксион»);

*А. Г. Серяков*, зам. гл. конструктора АО «Ижевский радиоавтомат»;

*В. В. Ханжин*, директор Ижевского регионального отделения Уральского филиала ПАО «МегаФон» по Удмуртской Республике;

*А. А. Шперлинг*, директор филиала ПАО «Ростелеком» по Удмуртской Республике

**П75 «Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства»** [Электронный ресурс]: сб. материалов XIV Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – 332 с. – 8,6 МБ (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 6.0 и выше.

ISBN 978-5-7526-0810-0

В сборник включены избранные, прошедшие рецензирование статьи по материалам докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства». Рассматривается широкий круг вопросов в области приборостроения.

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

Конференция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-20145 Г).

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-0810-0

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018

© Оформление. Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

*А. В. Абилов*, 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. А. Глушков*, рук. секции 1, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*И. В. Штенников*, рук. секции 1, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. В. Муравьев*, рук. секции 2, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*Г. В. Ломаев*, рук. секции 2, д-р техн. наук, проф. кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. Н. Котысов*, рук. секции 3, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. И. Нистюк*, рук. секции 3, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. В. Соболев*, рук. секции 3, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой «Физика и оптотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. А. Айзикович*, рук. секции 3, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой «Прикладная математика и информатика», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*С. В. Леньков*, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск);

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

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

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

*В. К. Барсуков*, канд. техн. наук, проф. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*В. А. Стародубцева*, канд. техн. наук, проф. кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*А. А. Богданов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Радиотехника», 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. Н. Емельянов*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

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

*А. Ю. Печенкин*, канд. техн. наук, доц. кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

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

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

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Радиотехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

*Б. И. Сибгатуллин*, ст. преподаватель кафедры «Электротехника», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

*И. А. Кайсина*, магистрант кафедры «Сети связи и телекоммуникационные системы», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова



Конференция проведена при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
(проект № 18-08-20145 Г)

Благодарим партнеров за помощь в награждении докладчиков



## Содержание

### Пленарная секция

<i>Аббакумов К. Е.</i> Ультразвуковая дефектоскопия – 90 лет. Творческое наследие С. Я. Соколова: эксперимент, практика, теория .....	8
<i>Каптикова С. М., Валеев Р. А., Балобанов Е. Н., Кузнецова А. А.</i> Разработка автоматизированного устройства навигации слепых и слабовидящих как пример совместной проектной деятельности станции юных техников и представителей производства .....	15

### Секция 1. Электронные средства и системы управления

<i>Алаев А. С., Кашмин О. С., Трушин Н. Н.</i> Оперативная диагностика деградации рабочей жидкости гидравлической системы .....	20
<i>Бабошкин Г. Д., Подсизерцев М. А., Ушаков П. А.</i> Выбор критериев качества управления АСУ для автоматизированной оптимизации параметров ПИД-регулятора дробного порядка .....	30
<i>Зямилов Р. И., Стародубцева В. А.</i> Система погодного регулирования отопления «умного дома» на базе микроконтроллера AVR .....	37
<i>Куликов В. А., Никитин К. А.</i> Малогабаритный малоинерционный термопреобразователь сопротивления для систем сбора информации .....	43
<i>Миронов А. А.</i> Комплекс систем для высокоэффективной беспроводной автономной зарядки беспилотных летательных аппаратов .....	50
<i>Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г.</i> Исследование влияния предельных воздействий на эксплуатационные характеристики суперконденсаторов .....	61
<i>Шамсияхметова В. О., Шамсияхметов О. Я., Глушков В. А.</i> Разработка учебного лабораторного макета на базе программно-аппаратных комплексов LabView и Arduino .....	73
<i>Штенников И. В., Кожевников К. В.</i> Разработка повышающего преобразователя напряжения резервного источника питания климатической системы специализированного подвижного объекта .....	83
<i>Штенников И. В., Ложкин Д. А., Черешев В. И.</i> Методика приготовления плоских образцов из герметиков и исследование их удельного электрического сопротивления .....	91

### Секция 2. Приборы в промышленности, здравоохранении и экологии

<i>Аббакумов К. Е., Степаненко Н. В.</i> Распространение крутильных волн в двухслойной трубе .....	98
<i>Белых В. В., Муравьев В. В., Степанов В. А.</i> Прогнозирование эксплуатационных характеристик рельсовой стали на основе нелинейной динамики .....	105
<i>Богдан О. П., Дудина Ю. С., Бабайлов Н. А.</i> Способ калибровки метода оценки размеров кавитационного пузырька .....	115

<i>Богдан О. П., Широбокова А. Д.</i> Исследование влияния различных факторов на погрешность измерения интенсивности ультразвукового излучения.....	120
<i>Джауль А. Л., Штенников И. В.</i> Тепловой эффект перлитных превращений при вакуумном хромировании .....	126
<i>Злобин Д. В., Богдан О. П., Волков В. В.</i> Экспериментальные исследования акустического импеданса вязкоупругих сред.....	132
<i>Муравьев В. В., Булдакова И. В., Волкова Л. В., Понькин М. А., Андреев А. В.</i> Проектирование электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн.....	140
<i>Муравьев В. В., Муравьева О. В., Платунов А. В., Мышкин Ю. В., Поташов Д. С.</i> Моделирование магнитного поля рассеяния над искусственными дефектами.....	146
<i>Муравьева О. В., Богдан О. П., Подсизерцева М. А.</i> Сравнительная оценка методик определения акустических импедансов вязкоупругих сред .....	155
<i>Муравьева О. В., Зорин В. А., Синцов М. А.</i> Выбор критериев браковки при акустическом контроле проката для производства бурильных труб с использованием рэлеевских волн.....	163
<i>Мышкин Ю. В., Муравьева О. В., Фотина А. А.</i> Обоснование применения изгибной волны для оценки толщины стенки трубы .....	171
<i>Назмудинова А. И., Миллих В. Н., Муравьева О. В., Дудина Ю. С., Кузнецов Е. П.</i> Возможности применения вейвлет-преобразования при обработке ультразвуковых изображений.....	184
<i>Петров К. В., Муравьева О. В., Зорин В. А., Башарова А. Ф., Федорова Г. Л.</i> Влияние растягивающих напряжений на скорости рэлеевской и поперечной акустических волн в стальных цилиндрических объектах.....	190
<i>Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Мкртчян С. С., Шорников К. Г.</i> Оценка производительности акустического метода структуроскопии арматуры из композитных материалов.....	198
<i>Тапков К. А., Муравьев В. В.</i> Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при эксплуатации .....	205
<i>Широков, В. А.</i> К вопросу создания глобальной гидроакустической системы навигации подводных объектов .....	213
<i>Шорников К. Г., Хасанов Р. Р., Мышкин Ю. В., Стрижак В. А., Мкртчян С. С.</i> Моделирование распространения акустических импульсов в композитной арматуре .....	221

### Секция 3. Физика, радиотехника и связь

<i>Бояришинов М. А., Васильев М. Ю., Колотов А. С.</i> Выбор приемопередающих модулей ISM диапазона для дистанционного управления в мишенном комплексе.....	230
<i>Бояришинов М. А., Хатбуллин Р. А., Зыкин А. А.</i> Удаленное управление контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW .....	237

---

<i>Гумиров Р. Ф., Марков М. М.</i> Определение оптимального усиления для достижения максимального динамического диапазона.....	245
<i>Зарипов М. Р., Алексеев В. А., Перминов А. С., Шульмин Д. Н.</i> Повышение эффективности лазерных систем.....	252
<i>Кайсина И. А., Титов В. В., Васильев Д. С., Мейтис Д. С., Абилов А. В., Кайсин А. Е.</i> Экспериментальное исследование эффективности протокола маршрутизации В.А.Т.М.А.Н. в сети с топологией точка-точка для FANET.....	259
<i>Мокрова С. М., Милич В. Н.</i> Анализ текстуры сплавов никеля с палладием при создании лент-подложек сверхпроводников второго поколения.....	268
<i>Перминов А. С., Юран С. И.</i> Подготовка базы данных фотоплетизмограмм.....	275
<i>Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А., Смирнова Н. В.</i> Обобщение прямого дискретного преобразования Фурье.....	281
<i>Пономарева О. В., Пономарев А. В., Пономарев В. А., Смирнова Н. В.</i> Обобщение обратного дискретного преобразования Фурье.....	292
<i>Савенков А. П., Сычев В. А.</i> Определение чувствительности бесконтактного устройства для измерения вязкости к влияющим величинам по модели измерений.....	302
<i>Симонов М. В., Закиров А. А., Шишаков К. В.</i> Модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях.....	310
<i>Талибуллин Р. Ф., Назаров С. Б., Шишаков К. В.</i> Режимы управления волновыми процессами в твердотельном волновом гироскопе с двухканальной системой возбуждения резонансных колебаний.....	318
<i>Шмаков А. С., Новикова С. В.</i> Исследование устойчивости корреляционного алгоритма распознавания образов на плоскости к геометрическим искажениям.....	325

## Пленарная секция

УДК 620.179.016

*К. Е. Аббакумов, д-р техн. наук, проф.*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет имени В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

### **Ультразвуковая дефектоскопия – 90 лет. Творческое наследие С. Я. Соколова: эксперимент, практика, теория**

*В докладе приводятся краткие сведения по истории формирования научной школы С. Я. Соколова в ЛЭТИ. Рассмотрены фрагменты технических решений лабораторных систем ультразвуковой дефектоскопии, оказавших заметное влияние на формирование современных средств неразрушающего контроля. Используются новые материалы, заимствованные из государственных и семейных архивов.*

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковая дефектоскопия, дефектоскоп, теневой метод контроля, рассеяние ультразвука, звуковидение.

#### **Введение**

В 1928 г., 2 февраля, молодой преподаватель кафедры «Специальная радиотехника» Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) Сергей Яковлевич Соколов направил заявку на способ и устройство для испытания материалов, по которым впоследствии был получен патент № 11371 [1]. Именно от этой даты мировая общественность ведет отсчет существования ультразвуковой дефектоскопии – науки о методах и приборах контроля качества материалов и изделий, которой в этом году исполняется 90 лет.

#### **Результаты и их обсуждение**

В 1925 г. после окончания обучения и защиты дипломного проекта на тему, связанную с проектированием передающего устройства связи для кораблей военно-морского флота, молодой инженер по приглашению научного руководителя профессора И. Г. Фреймана начал работать



на кафедре ассистентом. В качестве темы научных исследований ему было рекомендовано проверить и предложить способы стабилизации частоты радиопередатчиков с помощью кварцевых резонаторов.

Практически за три года после серии задуманных и осуществленных им же самим экспериментов С. Я. Соколову удалось обнаружить и дать описание целого ряда явлений, положенных им в основу нового научного направления – ультразвуковой дефектоскопии.

Схема устройства (рисунок), предложенного в заявке, выглядит весьма просто: пьезокварцевый преобразователь *B* расположен в ванне *A* с маслом, контакт преобразователя с изделием *L* осуществляется через слой ртути *P*, а в качестве индикатора используется слой масла *M*, рельеф поверхности которого наблюдается через лупу. Как видно по описанию, в этом первом патенте предложен «теневой» метод сквозного прозвучивания ультразвуковой дефектоскопии в иммерсионном варианте с непрерывным излучением.

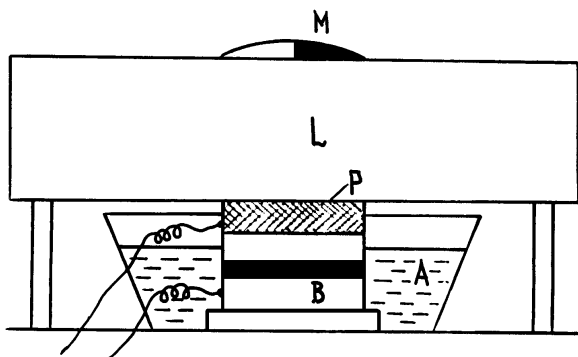


Схема «теневого» метода ультразвукового контроля

В статье [2], опубликованной в 1929 г. в Германии, С. Я. Соколов обобщил результаты своих исследований по распространению ультразвуковых волн в различных металлах и сформулировал обнаруженные им свойства ультразвука:

- способность проникать на большую глубину в металлы и обнаруживать в них неоднородности;
- зависимость затухания ультразвуковых волн от структуры металла и примесей, а в сталях – от степени их закалки;
- способность распространяться по проволоке на расстояние в несколько десятков метров и отражаться от ее конца.

В этой же работе впервые было предложено использовать одну и ту же пьезопластину как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвука, т. е. был сформулирован принцип совмещенного преобразователя с применением частотно-модулированных колебаний.

В конце 1929 г. на кафедре «Специальная радиотехника» была организована специализация по электроакустике, а уже в 1930 г. состоялся первый выпуск инженеров (4 человека). В 1931 г. была создана первая в стране кафедра «Электроакустика и ультразвуковая техника», бессменным заведующим которой до своей смерти в 1957 г. оставался С. Я. Соколов.

За десятилетний период (1931–1941) Соколовым были выполнены основные исследования и изобретения в области ультразвуковой дефектоскопии [3, 4]:

- разработан точечный пьезоэлектрический приемный преобразователь и исследовано распределение амплитуд колебаний как по поверхности излучающих сложных вибраторов, так и по поверхности прозвучиваемых изделий с внутренними несплошностями;
- предложен фокусирующий излучатель, в том числе с регулируемым механическим способом фокусным расстоянием;
- предложен сквозной теневой метод с частотной модуляцией путем автоматического изменения емкости колебательного контура генератора;
- предложен и реализован сквозной теневой и зеркально-теневой временные методы с импульсным излучением и модуляцией частоты;
- предложен резонансный метод измерения скорости звука в материале изделия;
- предложен наклонный ввод ультразвука в изделие, в том числе с возбуждением только поперечных волн;
- предложен и реализован эхо-метод ультразвуковой дефектоскопии с использованием отдельной схемы включения преобразователей и частотно-модулированного излучения;
- предложен и осуществлен электромагнитно-акустический метод возбуждения колебаний в изделии, основанный на взаимодействии вихревых токов с полем постоянного магнита;
- реализован низкочастотный акустический метод измерения частот собственных колебаний турбинных лопаток с целью обнаружения в них внутренних дефектов (трещин);
- предложено и реализовано несколько типов теневых дефектоскопов с различными методами автоматического сканирования и записью контуров дефектов с помощью различных систем.

Проведенные в этот период исследования, а также изобретения С. Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии намного опередили аналогичные работы других ученых и получили высокую оценку: в 1942 г. ему была присуждена Сталинская премия.

Вторым очень важным направлением работ С. Я. Соколова в области ультразвуковой дефектоскопии как до войны, так и в послевоенное время являются работы по звуковидению. Он считал, что необходимо не только обнаружить несплошности в изделии, но и установить их размеры и форму – визуализировать. К этому были все предпосылки, так как ультразвук оказался необычайно чувствителен к малейшим градиентам свойств вещества и способен визуализировать слабые неоднородности, которые не обнаруживаются другими методами.

Первой системой звуковидения, предложенной С. Я. Соколовым еще в 1928 г. [1] и подробно описанной в работе [5], была система, основанная на создании распределения поля на поверхности жидкости, – метод поверхностного рельефа. Дальнейшие исследования этого метода выполнил аспирант кафедры Е. Д. Пигулевский, который показал [6], что этот метод обладает высокой пороговой чувствительностью  $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> и разрешающей способностью 2 мм на частоте 3 МГц.

Значительно большей чувствительностью обладала система звуковидения, основанная на акустооптическом преобразовании в так называемой трубке Соколова – акустическом аналоге кинескопа, у которого светочувствительный экран заменен пьезоэлектрическим преобразователем [3]. Этот метод звуковидения, подробно исследованный аспирантом В. Г. Прохоровым [7], показал пороговую чувствительность порядка  $10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup> и разрешающую способность, как у предыдущего.

Еще более высокая чувствительность этого метода (порядка  $10^{-13}$  Вт/см<sup>2</sup>) была достигнута аспирантом П. В. Пономаревым [8] путем механического сканирования пьезоэлектрического рельефа, возникающего на пьезомишени под действием ультразвукового изображения. Однако из-за длительности механического сканирования он не мог применяться для контроля динамических изображений.

В предложенных С. Я. Соколовым методах и устройствах визуализации не использовался огромный потенциал, заложенный в том принципиальном отличии звуковидения от оптики и рентгена, которое обусловлено возможностью регистрации ультразвуковых сигналов с точностью до фазы. Этот потенциал полностью проявился с появлением оптической голографии. Парадокс заключается в том, что если в оптике развитие голографии стало возможным только после появления когерентных источников света – лазеров, то в акустике источники звука обладали очень высокой когерентностью. Уже в первых опытах с систе-

мами звуковидения [1, 3] регистрировалась интерференция падающих и отраженных от свободной поверхности жидкости когерентных ультразвуковых волн, т. е. образовывалась акустическая голограмма. Очевидно, это дало основание считать, что С. Я. Соколов является создателем акустической голографии [9].

Бюро отделения общей физики и астрономии АН СССР на своем заседании, состоявшемся 12 января 1972 г., установило, что С. Я. Соколовым сделано открытие, со следующей формулировкой: «Экспериментально обнаружено новое физическое явление, состоящее в том, что ультразвуковые волны при прохождении через твердые, жидкие или газообразные среды, содержащие неоднородности, образуют акустическое изображение этих неоднородностей, которое с помощью звукооптических устройств может быть преобразовано в видимое изображение». Приоритет С. Я. Соколова по данному открытию установлен авторским свидетельством [1].

После войны работы в области ультразвуковой дефектоскопии на кафедре возобновились лишь в 1947 г. с создания нового промышленного импульсного дефектоскопа (патент Файерстона Соколову уже был известен). К этой работе были привлечены три дипломника (А. Л. Давыдов, Б. Н. Машарский, Ю. В. Мирохин), а также группа студентов четвертого курса – А. И. Сауков, В. Г. Прохоров, Д. Б. Дианов, А. Е. Колесников и Е. С. Соколова. Несмотря на сложности с обеспечением электронными компонентами, энтузиазм молодых исполнителей позволил к концу 1948 г. изготовить несколько таких приборов, смонтированных из трофейных материалов. Прибор работал только по раздельной схеме с двумя преобразователями. После сдачи образцов заказчикам С. Я. Соколов перед этим же коллективом поставил новую задачу – перевести блоки прибора на отечественные радиолампы, обеспечить возможность работы прибора на один и два шупа, улучшить его разрешающую способность, уменьшить вес и габариты. К 1950 г., когда было разработано и передано в промышленность несколько еще довольно громоздких приборов, стало известно, что созданием ультразвуковых дефектоскопов усиленно занимаются еще две группы специалистов. Во главе одной из них стоял Д. С. Шрайбер (ВИАМ), второй – С. А. Матвеев (ЦНИИТМАШ). Несмотря на дружеские отношения Соколова с руководителями этих групп, дальнейшая работа по разработке дефектоскопов носила конкурентный характер. В лаборатории ЭУТ в работу одновременно были запущены три модели приборов – УЗД-10, УЗД-11, УЗД-12. Первая конструкция была относительно легкой (10 кг) с малой электронно-лучевой трубкой, УЗД-11 выпускался в блочном исполнении, а УЗД-12 – на едином шасси. Последний прибор оказался

наиболее удачным, и после усовершенствования и замены кварцевых преобразователей пьезокерамическими (титанат бария) стал производиться серийно под маркой УЗД-12Т. Заводских специалистов обучали работе с прибором на предприятиях, куда командировались сотрудники лаборатории, работающие дипломники и некоторые студенты.

За работы в области ультразвуковой микроскопии, разработку и внедрение в заводскую практику ультразвуковых дефектоскопов С. Я. Соколову, его сотрудникам А. Л. Давыдову, Б. Н. Машарскому, механикам Г. Е. Грачеву и И. В. Кулакову, А. С. Матвееву (ЦНИИТ-МАШ) и Н. И. Барышникову (завод «Электросталь») уже в 1951 г. была присуждена Сталинская премия.

В 1951–1957 гг. в лаборатории ультразвуковой дефектоскопии кафедры под руководством С. Я. Соколова работали А. Л. Давыдов, Б. Н. Машарский, Е. А. Корепин, В. М. Веревкин, А. Е. Колесников, А. С. Голубев, А. В. Гусев, В. А. Щукин, Е. Д. Пигулевский, И. Ф. Лопатко, П. Н. Петров, Ю. М. Быстров, Б. Е. Михалев, Л. А. Яковлев, А. В. Харитонов, К. С. Александров, В. В. Богородский и многие студенты. План выпуска составлял не менее 40 приборов в год, так что за этот период было изготовлено и продано заказчикам более 300 дефектоскопов УЗД-12Т, УЗД-14 и УЗД-16.

Разработка ультразвуковых дефектоскопов для контроля различных материалов требовала проработки вопросов чувствительности, исследования влияния поглощения и рассеяния звука в конструкционных материалах, оптимизации характеристик пьезопреобразователей. Определение чувствительности контроля изделий эхометодом исследовалось Б. Н. Машарским [4]. Теоретические и экспериментальные исследования поглощения и рассеяния звука в поликристаллических средах выполнил аспирант кафедры Л. Г. Меркулов. Он установил количественную связь между коэффициентом затухания, средним размером зерна и их упругой анизотропией [4]. В дальнейшем они были использованы при разработке ультразвукового дефектоскопа-структурометра УЗДС-18 (А. С. Голубев, А. Е. Иванов).

## **Выводы**

Исследования распространения и затухания ультразвуковых волн в различных материалах, включая кристаллы, выполненные на кафедре, открыли перспективы их применения в толщинометрии, неразрушающим контроле, структурометрии и при оценке физико-механических характеристик, в частности для микродефектоскопии кристаллической решетки, связанной с изучением дислокаций [4]. В настоящее время коллектив кафедры продолжает успешно работать над исследованием и

разработкой методов и средств ультразвукового контроля материалов и изделий и других применений ультразвука.

### Список литературы

1. Пат. 11371 СССР, кл. 42к 29. Способ и устройство для испытаний металлов / Соколов С. Я. ; заявл. 02.02.1928 ; опубл. 30.09.1929 // Вестник Комитета по делам изобретений. – 1929. – № 6.
2. *Sokolov, S. J.* Zur Frage der Fortpflanzung ultra-akustischer Schwingungen in verschiedenen Körpern // Elektrische Nachrichten-Technik. – 1929. – В. 6. – Н. 11. – S. 454–461.
3. *Соколов, С. Я.* Избранные труды. – СПб. : СПбГЭТУ, 1997. – 263 с.
4. *Паврос, С. К.* Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // Известия ГЭТУ. – 1997. – Вып. 505. – С. 5–11.
5. *Соколов, С. Я.* Ультеракустические колебания и их применение // Заводская лаборатория. – 1935. – № 5. – С. 527–538.
6. *Пигулевский, Е. Д.* О чувствительности и разрешающей способности акустооптического преобразователя на поверхности жидкости // Акустический журнал. – 1958. – Т. 4, № 4. – С. 348–354.
7. *Прохоров, В. Г.* Электронно-акустический преобразователь // Акустический журнал. – 1957. – Т. 3, № 3. – С. 348–354.
8. *Пономарев, П. В.* Опытная установка для видения ультразвукового поля // Известия ЛЭТИ. – 1958. – Вып. 34. – С. 224–228.
9. *Уэйд, Г.* Системы акустического изображения. – Л. : Судостроение, 1981. – 240 с.

*K. E. Abbakumov*, DSc in engineering, professor  
St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”,  
Saint Petersburg, Russian Federation

### **Ultrasonic Nondestructive Testing – 90 Years. Creative Heritage of S. Ya. Sokolov: Experiment, Practice, Theory**

*The report provides brief information on the history of the formation of S.Y. Sokolov's scientific school at LETI. The fragments of technical solutions of laboratory systems of ultrasonic nondestructive testing, which influenced the formation of modern nondestructive testing tools, are considered. New materials were used, borrowed from state and family archives.*

**Keywords:** ultrasound, ultrasonic nondestructive testing, flaw detector, shadow control method, ultrasound scattering, sound vision.

УДК 621.389

С. М. Каптикова, методист  
Р. А. Валеев, ученик  
E-mail: metodist\_sut18@mail.ru

МБОУ ДО «СЮТ Устиновского района г. Ижевска»

Е. Н. Балобанов, канд. техн. наук, начальник КБ отдела ТМ-систем и БЦВК  
А. А. Кузнецова, канд. техн. наук, инженер-конструктор отдела ТМ-систем и БЦВК  
ООО «ИРЗ», г. Ижевск

## **Разработка автоматизированного устройства навигации слепых и слабовидящих как пример совместной проектной деятельности станции юных техников и представителей производства**

*На примере проекта по разработке автоматизированного устройства навигации слепых и слабовидящих рассмотрен механизм взаимодействия учреждений среднего, высшего и дополнительного образования, а также производства в рамках научно-исследовательских работ школьников. Рассмотрены возможные варианты наставничества на различных этапах проектирования. Представлены результаты инженерно-технической деятельности авторского коллектива, состоящего из педагога учреждения дополнительного образования, школьника и наставника, выполняющего роль научного руководителя проекта.*

**Ключевые слова:** проектная деятельность, образование, приборостроение, автоматизированное устройство.

### **Введение**

В соответствии с целью приоритетного проекта «Доступное дополнительное образование детей» к 2020 г. 2,9 млн детей в возрасте от 5 до 18 лет должны быть охвачены общеразвивающими программами технической и естественно-научной направленности. Актуальность инженерного образования определяется значимостью формирования у детей различных комбинаций знаний, умений и компетентностей, повышающих их конкурентоспособность на рынке труда. Основным механизмом развития конкурентоспособности выпускников школ является образовательный процесс.

---

© Каптикова С. М., Валеев Р. А., Балобанов Е. Н., Кузнецова А. А., 2018

Работа выполнена при поддержке программы «УМНИК» (решение конкурсной комиссии Фонда, протокол заседания дирекции № 6 об утверждении итогов конкурсного отбора от 6 сентября 2016 г.).

В настоящее время создано большое количество площадок для занятий инженерным творчеством для детей, начиная с младшего школьного возраста и заканчивая старшеклассниками. Однако динамика развития подобных программ за несколько лет незначительна. За один учебный год создается множество проектов, связанных с конструированием автоматизированных устройств, но далеко не все они получают свое дальнейшее развитие. В начальной школе эти проекты, как правило, не имеют какой-то реальной практической значимости. Но ближе к старшим классам наряду с такими критериями, как актуальность, новизна и личный вклад автора, на первый план выходит практическая значимость и научно-исследовательская составляющая проекта. Выполнение школьного проекта с возможностью представления его на конкурсах всероссийского уровня требует взаимодействия с высшими учебными заведениями и представителями промышленных предприятий. Кроме того, участие школьников в совместных инженерно-технических проектах способствует ранней профориентации и во многом предопределяет выбор вида деятельности после окончания школы.

Задачей внедрения инженерно-технического образования детей, обучающихся в образовательных организациях общего образования (школах), является не только расширение базовых учебных программ основами специальных предметов (электротехники, микроэлектроники, цифровой схемотехники и т. д.), но и развитие практических навыков конструирования и прототипирования.

Для решения поставленной задачи на базе учреждения дополнительного образования станции юных техников Устиновского района г. Ижевска в 2015 г. был создан «STEM-центр Intel» под эгидой Всероссийского Фестиваля науки (г. Москва). Создание структуры STEM-центра (сеть образовательных центров по направлению науки, технологий, инженерии и математики) позволило привлечь наставника, имеющего опыт научно-исследовательской деятельности на уровне высшего учебного учреждения, и организовать рабочие проектные группы обучающихся.

### **Реализация совместного проекта**

Рассмотрим механизм совместной работы на примере проекта «Автоматизированное устройство навигации для слепых и слабовидящих». Научным руководителем была поставлена задача разработки электрического макета устройства, которое представляет собой ботинок с установленными на него ультразвуковыми и оптическими датчиками, дальность обнаружения препятствия от 0,5 до 3 м, время автономной работы не менее 4 часов, питание от встроенного аккумулятора.



Для прототипирования использованы ультразвуковой датчик HC-SR04 (рабочее напряжение 5 В, рабочий ток 15 мА, диапазон измерений от 0,02 до 4 м, угол измерения 15 градусов) и инфракрасный датчик SHARP 240A21F46 (номинальное напряжение питания от 4,5 до 5,5 В, ток потребления 30 мА, измеряемое расстояние от 0,1 до 0,8 м). Оповещение о препятствиях на пути следования осуществляется тактильно. Макет автоматизированной системы навигации собран на основе ATmega 328.

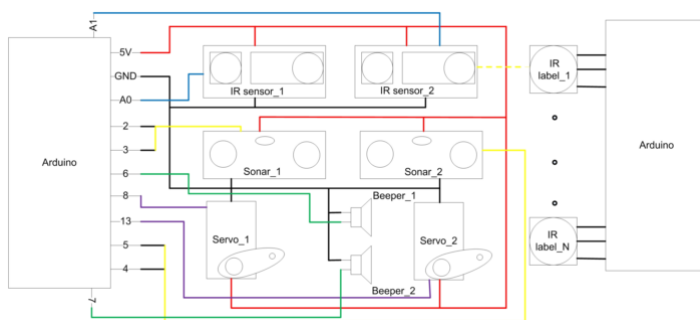


Рис. 1. Макет автоматизированной системы

Для решения задачи прокладывания маршрута незрячего внутри помещения предложено использование ИК-меток в качестве опорных точек.



Рис. 2. Прокладывание маршрута следования внутри помещения по ИК-меткам

Принцип работы ИК-меток основывается на генерации инфракрасного излучения в виде импульсов заданной длительности и частоты. В качестве инфракрасного передатчика выступает инфракрасный диод, генерация импульсов осуществляется при помощи платы Arduino Nano. Для защиты канала связи при передаче информации применяется метод модуляции несущей частоты инфракрасных сигналов. Стандартные частоты модуляции – 30–50 кГц. Приемник ИК-излучения состоит из сле-

дующих элементов: PIN-фотодиод, усилитель, полосовой фильтр, амплитудный детектор, интегрирующий фильтр и выходной транзистор. ИК-приемник подключается к микроконтроллеру и настраивается на прием информационных пакетов, соответствующих номеру кабинета учебного учреждения.

На этапе макетирования проект по разработке устройства навигации слепых и слабовидящих внутри помещения получил финансовую поддержку по программе «УМНИК», что дало возможность привлечь к реализации проекта специалистов ООО «ИРЗ». В настоящее время разработана 3D-модель корпуса устройства в виде съемного браслета на обувь.

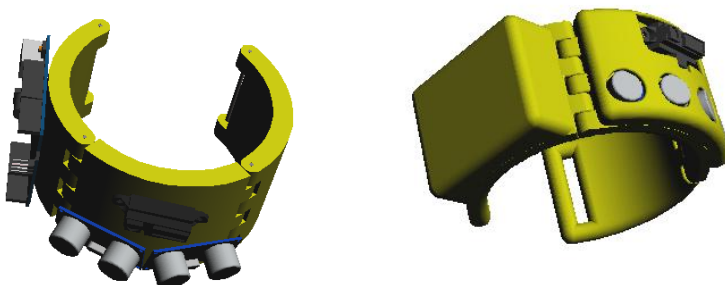


Рис. 3. Общий вид съемного устройства навигации слепых и слабовидящих

В результате работы над проектом авторами получен патент на полезную модель «Устройство навигации слепых и слабовидящих» № 182221 от 07.08.2018 г.

### **Выводы**

На примере проекта «Устройство навигации для слепых и слабовидящих» показан потенциал совместных проектных групп с привлечением учеников средних общеобразовательных учреждений и наставников, имеющих опыт научно-исследовательской деятельности в высших учебных учреждениях.

Семь проектов, работа над которыми была построена с использованием института наставничества, были представлены на XIII Международной научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства» (22–24 ноября 2017 г.) и получили высокие оценки научных экспертов.

## Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» за сотрудничество.

## Список литературы

1. Пат. 182221 Российская Федерация, МПК А 61 F 9/08. Устройство навигации слепых и слабовидящих / Каптикова С. М., Кузнецова А. А., Балобанов Е. Н., Попов В. В. – № 2017144403 ; заявл. 18.12.2017 ; опубл. 07.08.18.
2. *Песттун, М. В.* Методы построения навигационных когнитивных карт : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.13.11. – М., 2014. – 18 с.
3. *Тюкин, А. Л.* Разработка и анализ алгоритмов цифровой обработки телевизионных изображений для задач позиционирования в помещении по маякам с цветовой кодировкой : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 05.12.04. – Ярославль, 2015. – 18 с.

*S. M. Kaptikova*, teacher

*R. A. Valeev*, school student

E-mail: metodist\_sut18@mail.ru

SUT of Ustinovsky district of Izhevsk

*E. N. Balobanov*, CSc in engineering, head of design bureau

*A. A. Kuznetsova*, CSc in engineering, engineer

ООО “IRZ”, Izhevsk, Russian Federation

## **Development of an Automated Navigation Device for the Blind and Visually Impaired People, as a Collaborative Project between Aspiring Young Technicians and Industry Representatives**

*This collaborative project between students and industry representatives demonstrates how interactions between schools and industry can achieve innovation, using a navigation device for the blind and sight impaired as an example. The authors group includes a teacher for continuing education, a student, and a mentor who has the role of scientific project leader.*

**Keywords:** project activities, education, instrumentation, automated device.

## Секция 1. Электронные средства и системы управления

УДК 621.22

*А. С. Алаев*, инженер-технолог

E-mail: [sanya7oct@yandex.ru](mailto:sanya7oct@yandex.ru)

ПАО «Тульский оружейный завод»

*О. С. Кашмин*, канд. техн. наук, доц.

*Н. Н. Трушин*, д-р техн. наук, проф.

E-mail: [trushin@tsu.tula.ru](mailto:trushin@tsu.tula.ru)

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

### **Оперативная диагностика деградации рабочей жидкости гидравлической системы**

*Рассматривается метод оперативной диагностики качества минерального масла, применяемого в гидравлических системах машин различного назначения. В качестве комплексного критерия ухудшения свойств масла используется величина диэлектрической проницаемости, изменяющейся пропорционально времени и интенсивности эксплуатации гидравлических устройств. Приводится описание экспериментального прибора с микроконтроллерным управлением, осуществляющего непрерывное измерение диэлектрической проницаемости эксплуатируемого минерального масла.*

**Ключевые слова:** гидравлический привод, минеральное масло, деградация, диагностика.

#### **Введение**

Гидравлические приводы чрезвычайно широко используются в машинах самого различного назначения благодаря своим многочисленным достоинствам. При этом работоспособность гидравлических систем существенно зависит от эксплуатационных свойств рабочей жидкости, в качестве которой чаще всего используется минеральное масло [1].

Ресурс минерального масла в процессе работы гидросистемы определяется ее состоянием. В процессе эксплуатации гидравлического оборудования происходит «старение», или деградация, масла, которое проявляется как ухудшение его физических и химических свойств. Замена рабочих жидкостей в большинстве гидросистем машин производится,

как правило, в плановом порядке на основе нормативных интервалов времени, установленных производителями гидравлического оборудования. Однако условия эксплуатации и режимы работы гидрофицированных технологических машин достаточно разнообразны, поэтому принудительная замена рабочей жидкости гидросистемы в плановом порядке не всегда эффективна [2].

Для осуществления процедуры замены рабочей жидкости гидросистем по её фактическому состоянию необходим непрерывный оперативный инструментальный контроль состояния жидкости в процессе ее эксплуатации. Существующие методы оценки состояния рабочих жидкостей гидросистем машин основаны на методах лабораторного анализа физико-химических свойств жидкости на основе отбора проб.

Существенными недостатками методов лабораторного анализа являются их высокая трудоёмкость и стоимость технического оборудования, а также относительно длительное время ожидания результатов. Качество анализа зависит и от правильности выполнения отбора проб, что также может накладывать определенные погрешности на результаты анализа.

Оценка состояния масла только по одному единичному показателю качества является привлекательной с точки зрения её практической реализации, но может привести к неправильным выводам относительно продолжения эксплуатации масла. Поэтому поиск комплексного критерия, который бы наиболее полно и с минимальными затратами характеризовал состояние рабочей жидкости в процессе эксплуатации гидросистемы, является актуальной научно-технической задачей.

По мнению специалистов корпорации EATON, одним из направлений дальнейшего совершенствования гидравлических устройств является концепция «умной» гидравлики, в которой гидравлические устройства объединяются с «передовыми электротехническими решениями». Важный аспект данной концепции – непрерывный контроль состояния всех компонентов гидросистемы, включая рабочую жидкость.<sup>2</sup>

### **Постановка задачи**

Минеральное масло является диэлектриком, так как имеет ничтожно малую электрическую проводимость. Поведение электрического поля в диэлектрическом веществе определяется главным образом его диэлектрической проницаемостью [3]. В зависимости от природы базового масла (минеральное, синтетическое или их смесь) и пакета вводимых

---

<sup>2</sup> Гидравлические решения EATON: инновации – интеграция – интеллект // Индустрия. Межотраслевой информационно-аналитический журнал. 2012. № 3. С. 42.

присадок масла обладают определенными диэлектрическими свойствами. На значение диэлектрической проницаемости минеральных масел оказывают влияние и свойства присадок. Большинство присадок содержат в своем составе металлы и кислородсодержащие соединения с диэлектрической проницаемостью, резко отличающейся (в сторону увеличения) от диэлектрической проницаемости компонентов базовых масел.

В процессе эксплуатации масло выполняет также функции накопителя продуктов окисления, изнашивания и загрязнений, образующихся при работе гидравлических устройств, что приводит к изменению химических и электрофизических свойств масла [4–6]. Эти изменения вызывают ухудшение свойств масла. Насыщение масла продуктами окисления также приводит к росту величины диэлектрической проницаемости. Рост величины диэлектрической проницаемости масла наблюдается также и с увеличением относительной массовой концентрации проводящих примесей, попадающих в него во время эксплуатации гидрофицированного оборудования [7, 8].

Таким образом, диэлектрическая проницаемость минерального масла определяется непосредственно химическим составом масла, который определяется физико-химическими показателями, а также наличием и концентрацией загрязняющих примесей, присутствующих в масле. Приобретенные свойства эксплуатируемого масла за счет продуктов окисления и загрязнения изменяют его диэлектрическую проницаемость [10, 11].

Если свежее масло имеет диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_m$ , то в связи со свойствами аддитивности работающее масло приобретает диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_p$ , которая определяется по формуле

$$\varepsilon_p = \varepsilon_m + \Delta\varepsilon, \quad (1)$$

где  $\Delta\varepsilon$  – приращение диэлектрической проницаемости.

Масло и большинство загрязняющих компонентов (вода, продукты окисления и износа, частицы пыли), обладая диэлектрическими свойствами, образуют статистическую смесь с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_m$ .

Выбор функциональной зависимости для описания диэлектрической проницаемости статистической смеси выполнялся при соблюдении следующих условий. Во-первых, был использован «постулат пропорциональности» – если значения всех компонентов смеси  $\varepsilon_i$  изменяются в одном и том же соотношении, то и значение диэлектрической прони-

цаемости смеси  $\varepsilon_M$  должно изменяться в том же соотношении. В частности, формула должна оставаться справедливой, если в нее будут представлены значения соответствующих абсолютных диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_0\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_0\varepsilon^*$ . Во-вторых, формула должна быть симметричной в отношении всех компонентов, то есть значение  $\varepsilon_M$  не должно изменяться при изменении номеров  $i$ , которыми нумеруются те или иные компоненты. Если значения  $\varepsilon_i$  для всех компонентов одинаковы, то  $\varepsilon^*$  должно совпадать с этим единственным значением. Если в смеси имеется лишь один компонент ( $m = 1$  и  $v = 1$ ), значение  $\varepsilon_p$  также должно совпадать со значением  $\varepsilon_i$ , где  $\varepsilon_i$  – диэлектрические проницаемости компонентов смеси,  $v_i$  – объемные концентрации компонентов в смеси,  $m$  – число компонентов в смеси.

Поскольку основными видами загрязнений масел в гидравлических приводах технологических машин являются вода, частицы атмосферной пыли и металлические частицы, то были определены зависимости, определяющие влияние каждого вида загрязнений на диэлектрическую проницаемость минерального масла.

При загрязнении масла загрязнениями в виде частиц атмосферной пыли эффективная диэлектрическая проницаемость смеси аппроксимируется эмпирической зависимостью Оделевского для матричного расположения частиц в смеси:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \left( 1 + \frac{v_2}{\frac{1-v_2}{3} + \frac{v_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}} \right). \quad (2)$$

В данном случае предполагается, что загрязняющие частицы пыли не соприкасаются друг с другом. В этом случае изменение эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon^*$  связано с нарушением герметичности соединений гидропривода и возможностью свободного доступа частиц пыли в масло через неплотности в соединениях сопрягаемых деталей.

Для оценки загрязнений работающего масла водой, которая не образует никаких регулярных структур в масле, выбрана формула Оделевского для двухкомпонентных статистических смесей с хаотически расположенными загрязняющими компонентами в смеси:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon^* &= A + \sqrt{A^2 + \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2}} \\ A &= \frac{1}{4} [(3\nu_1 - 1)\varepsilon_1 + (3\nu_2 - 1)\varepsilon_2] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_p = 81$  – диэлектрическая проницаемость воды;  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon^*$  – объемные концентрации свежего масла и воды соответственно. При этом должно выполняться условие  $\nu_1 + \nu_2 = 1$ .

Для оценки влияния концентрации загрязнений металлическими износными частицами была выбрана формула Брюгемана, поскольку данные частицы являются проводниками и для них диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$ :

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_1}{(1 - \nu_2)^3} \quad (4)$$

При применении данной зависимости должно выполняться условие, при котором диэлектрическая проницаемость металлических частиц износа  $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$  и концентрация металлических частиц в масле  $\nu_2 \ll 1$ .

Наибольшее влияние на диэлектрическую проницаемость масла оказывает содержание металлических частиц и воды, поскольку значения диэлектрической проницаемости воды много больше значения диэлектрической проницаемости масла, а металлические частицы являются проводниками. Содержание частиц атмосферной пыли в масле также увеличивает диэлектрическую проницаемость масла, но не так сильно, как первые два вида.

### Описание эксперимента

Авторами была сконструирована экспериментальная измерительная ячейка, принципиальная схема которой изображена на рис. 1 [12].

Измерительная ячейка представляет собой плоский конденсатор – это две параллельные пластины с активной площадью обкладок  $S$ , расположенные на расстоянии  $d$ . Обкладки выполнены из медной фольги. Применение ячеек из металла является более предпочтительным, так как они обеспечивают лучшее экранирование. В данном случае пластины в измерительной ячейке были установлены с зазором 4 мм. Пластины имеют форму прямоугольника со сторонами  $35 \times 30$  мм, площадь перекрытия пластин составляет  $S = 1050 \text{ мм}^2$ . Обкладки конденсатора разделяются слоем диэлектрика, в качестве которого выступает



диагностируемое масло. Таким образом, емкость измерительного конденсатора определяется значением диэлектрической проницаемости среды, окружающей обкладки ячейки.

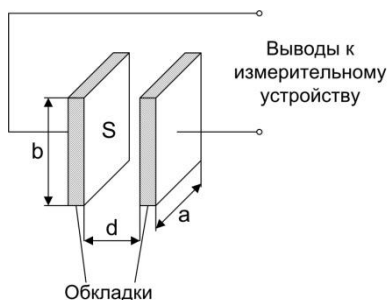


Рис. 1. Конструкция измерительной ячейки

Емкость измерительной ячейки определяется следующим выражением:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (5)$$

где  $d$  – расстояние между пластинами (толщина диэлектрика);  $S$  – площадь пластин конденсатора;  $\varepsilon_p$  – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, помещенного в пространстве между пластинами конденсатора.

В общем виде измерение емкости производится за счет подачи на электроды емкостного датчика сигнала возбуждения. Изменения емкости датчика преобразуются в изменения напряжения, тока, частоты или ширины импульсов.

Для экспериментального устройства была использована плата Arduino UNO, построенная на микроконтроллере ATmega328P. Для измерения емкости измерительной ячейки использовался «прямой метод», подразумевающий заряд конденсатора от источника тока и затем измерение напряжения на конденсаторе. На рис. 2 представлен фрагмент из программной среды Proteus, показывающий, к каким выводам платы микроконтроллера подключалась измерительная ячейка [13].

Приложение, обеспечивающее работу данной системы, было написано на языке программирования Wiring. Величина емкости в процессе экспериментов выводилась на дисплей. С целью отладки прибора на дисплей также выводился цифровой код, соответствующий напряжению на выходе контроллера A0. Для получения более точных результатов

измерений емкости конденсатора данное устройство было откалибровано с помощью конденсатора известной емкости. Периодичность измерения емкости конденсатора задается программно в миллисекундах.

### Результаты и их обсуждение

В качестве объекта контроля выступало, в частности, синтетическое моторное масло ZIC X7 LS 10W-40. Для оценки его состояния с определенной периодичностью отбирались пробы масла из гидравлической системы машины. В данную пробу помещался измерительный конденсатор. Для анализа и оценки свойств масла использовалось среднее значение нескольких измерений для исключения влияния случайных составляющих на результат.

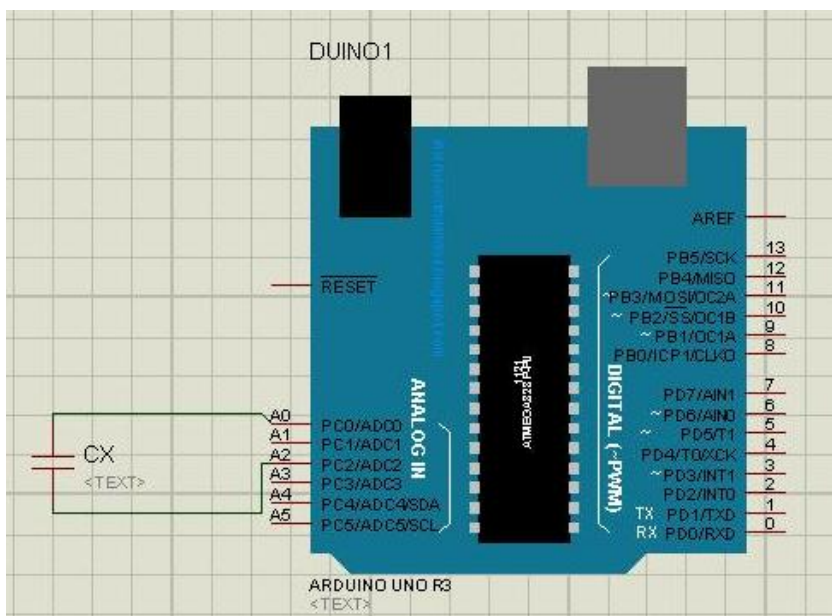


Рис. 2. Схема подключения измерительной ячейки к выводам контроллера Arduino Uno

Для того чтобы выявить зависимость емкости измерительного конденсатора, погруженного в масло, от срока его работы в гидроприводе была произведена оценка емкости конденсатора, погруженного в свежее масло. Для построения графика изменения емкости измерительного конденсатора, погруженного в работающее масло, в зависимости от на-

работки технологической машины в часах использовались средние значения нескольких измерений (таблица).

### Изменение емкости измерительной ячейки

Время наработки масла $T$ , ч	0	200	400	600	800
Значение емкости измерительного конденсатора $C$ , пФ	10,184	10,739	11,149	11,592	11,888

На основании данных таблицы был построен график изменения емкости измерительной ячейки, погруженной в масло, в зависимости от срока эксплуатации масла в гидроприводе (рис. 3).

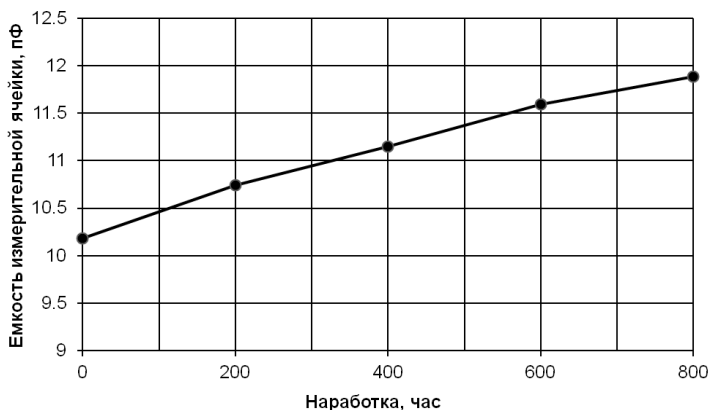


Рис. 3. Зависимость емкости измерительной ячейки от наработки масла

Из представленного графика видно, что емкость измерительной ячейки пропорционально увеличивается в зависимости от наработки исследуемого масла. Поскольку по мере увеличения наработки концентрация загрязняющих веществ в масле увеличивается, то можно сделать вывод, что выполненные исследования изменения ёмкости измерительной ячейки показали устойчивую корреляцию диэлектрической проницаемости эксплуатируемого минерального масла в зависимости от насыщения продуктами износа от гидроустройств. В результате многократных замеров емкости измерительной ячейки среднее квадратичное отклонение значений составило  $\sigma = 0,081$ , что свидетельствует о стабильности результатов измерения. Погрешность измерения емкости укладывается в диапазон  $\pm 5\%$ .

## Выводы

Экспериментальные исследования измерительной ячейки показали устойчивую корреляцию диэлектрической проницаемости как минерального, так и синтетического масла в зависимости от степени его загрязненности. Применение диэлектрической проницаемости как критерия деградации масла в процессе его эксплуатации в гидроприводе машины позволяет проводить непрерывный мониторинг гидросистемы и выполнять оптимальную замену масла по его фактическому состоянию. Современная цифровая техника позволяет оснастить существующие и вновь создаваемые гидрофицированные машины автоматизированными измерительными установками. Всё это позволяет повысить эффективность эксплуатации гидравлического оборудования на основе оптимизации периодичности замены масла исходя из условий эксплуатации каждой конкретной машины [15].

## Список литературы

1. *Свешников, В. К.* Станочные гидроприводы : справочник. – СПб. : Политехника, 2015. – 627 с.
2. *Чиликин, А. А.* Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем / А. А. Чиликин, Н. Н. Трушин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 3. – С. 117–127.
3. *Борисова, Г. А., Койков, С. Н.* Физика диэлектриков / Г. А. Борисова, С. Н. Койков. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1979. – 240 с.
4. *Коновалов, В. М.* Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков / В. М. Коновалов, В. Я. Скрицкий, В. А. Рокшевский. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.
5. *Фитч, Дж.* Анализ масел: основы и применение / Дж. Фитч, Д. Тройер. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2015. – 176 с.
6. *Бродский, Г. С.* Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин. – М. : Журн. «Горная промышленность» (НПК «ГЕМОС Лтд.»), 2003. – 360 с.
7. *Тарасов, П. И.* Диагностика состояния механизмов по параметрам работающих масел / П. И. Тарасов, Ю. А. Гурьянов // Горная промышленность. – 2005. – № 1. – С. 57–61.
8. *Чиликин, А. А.* Критерии старения рабочей жидкости гидравлического привода станков в процессе эксплуатации / А. А. Чиликин, Н. Н. Трушин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. – Ч. 2. – С. 536–545.
9. *Зубкова, С. Ю.* Комплексный анализ масла для диагностики оборудования / С. Ю. Зубкова, Р. А. Романов // Станочный парк. – 2016. – № 10. – С. 30–31.
10. Диагностика агрегатов машин методом высоковольтного тлеющего разряда : монография / Ю. А. Власов, Э. И. Удлер, Н. Т. Тищенко, Ю. С. Саркисов. – Томск : Изд-во ТомГАСУ, 2013. – 198 с.

11. *Алаев, А. С.* Диагностика состояния рабочей жидкости по электрофизическим показателям / А. С. Алаев, Н. Н. Трушин // Новые решения в области упрочняющих технологий: Взгляд молодых специалистов : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф. – В 2 т. – Т. 1. – Курск : Университетская книга, 2016. – С. 124–127.

12. *Алаев, А. С.* Информационная система диагностики состояния рабочей жидкости в гидросистемах машин / А. С. Алаев, Н. Н. Трушин // Современные технологии в науке и образовании – СНТО-2017 : сб. тр. II Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. – В 9 т. – Т. 2 / под общ. ред. О. В. Миловзорова. – Рязань : РГРТУ, 2017. – С. 54–57.

13. *Петин, В. А.* Проекты с использованием контроллера Arduino. – СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.

14. *Алаев, А. С.* Автоматизация диагностики рабочей жидкости в гидросистемах металлорежущих станков / А. С. Алаев, Н. Н. Трушин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 8. Ч. 2. – С. 258–264.

*A. S. Alaev, industrial engineer*

*E-mail: sanya7oct@yandex.ru*

*JSC "Tula Arms Plant"*

*O. S. Kashmin, CSc in engineering, associate professor*

*N. N. Trushin, DSc in engineering, professor*

*E-mail: trushin@tsu.tula.ru*

*Tula State University, Tula, Russian Federation*

## **Online Hydraulic Fluid Degradation Assessment**

*An online hydraulic mineral oil quality assessment procedure is considered. An integrated oil degradation factor is its permittivity that varies with the hydraulic component service life and operating rate. A micro controller-enabled test bench for continuous mineral oil permittivity measurement while in operation is proposed.*

**Keywords:** hydraulic drive, mineral oil, degradation, diagnostics.

УДК 004.942

Г. Д. Бабошкин, аспирант  
М. А. Подсизерцев, аспирант  
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.  
E-mail: glbaboshkin@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Выбор критериев качества управления АСУ для автоматизированной оптимизации параметров ПИД-регулятора дробного порядка**

*В статье рассматривается проблема отсутствия методик расчета коэффициентов управления ПИД-регулятора дробного порядка. В качестве решения проблемы предлагается программное обеспечение для расчета коэффициентов управления с помощью генетического алгоритма. В статье представлен анализ критериев качества управления автоматических систем управления и выбор наиболее подходящих в качестве целевой функции генетического алгоритма. Представлены результаты оптимизации АСУ для критериев по запасу по фазе, а также частотному коэффициенту колебательности и интегральному квадрату отклонению. Представлено итоговое решение многокритериальной оценки результатов оптимизации АСУ.*

**Ключевые слова:** автоматическая система управления, ПИД-регулятор дробного порядка, частотный коэффициент колебательности, интегральное квадратичное отклонение, оптимизация, генетический алгоритм, запас по фазе.

### **Введение**

ПИД-регулятор дробного порядка, или фрактальный ПИД-регулятор (ФПИД-регулятор) [1] – устройство, интенсивно исследуемое в наши дни, применение которого в автоматических системах управления (АСУ) позволяет достичь формы переходной характеристики лучшей, чем с классическим ПИД-регулятором.

Преимуществом ФПИД-регулятора перед классическим является то, что дробный порядок И- и Д-звеньев позволяет добиться наклона соответствующих участков АЧХ регулятора величиной менее 20 дБ/дек. Это позволяет снизить реакцию этих звеньев на возникающую ошибку и избежать высоких значений перерегулирования, статической ошибки и времени установления.

Добиться описанного эффекта можно, применяя в И- и Д-цепях классического ПИД-регулятора элемент с фрактальным импедансом (ЭФИ). Подробное описание ЭФИ отражено в [2].

Однако проектирование таких систем – очень сложный и трудоемкий процесс ввиду отсутствия прямых взаимосвязей между коэффициентами управления ФПИД-регулятора и качественными характеристиками переходного процесса. Поэтому актуальной проблемой на сегодняшний день является разработка автоматизированных средств для оптимизации коэффициентов управления ФПИД-регулятора, руководствуясь требуемыми критериями качества АСУ и видом объекта управления, применяемого в АСУ.

Целью данной статьи является рассмотрение возможных критериев качества управления АСУ дробного порядка и выбор наиболее подходящих для разработки автоматизированных средств оптимизации ФПИД-регулятора.

### Сведения из теории

Анализ критериев качества управления АСУ производился для программного обеспечения, описанного в работе [3], построенного на операторах генетического алгоритма, представленных в [4]. Выбранные критерии качества должны играть роль целевой функции для алгоритма [5].

В первую очередь были рассмотрены временные критерии качества, такие как перерегулирование и время регулирования. Однако их использование оказалось невозможным ввиду сложности описания переходной характеристики АСУ дробного порядка. Передаточную функцию АСУ дробного порядка можно описать уравнением:

$$W_{ACS} = \frac{W_o \cdot W_{FOPID}}{1 + W_o \cdot W_{FOPID}},$$

где  $W_o$  – передаточная функция объекта управления, а  $W_{FOPID}$  – передаточная функция ПИД-регулятора дробного порядка, описываемая выражением:

$$W_{FOPID} = Kd \cdot s^\lambda + \frac{Ki}{s^\delta} + Kp, \quad (1)$$

где  $Ki$ ,  $Kp$ ,  $Kd$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  – коэффициенты управления ФПИД-регулятора, причем  $\delta \in (0;1)$ ,  $\lambda \in (0;1)$ .

Проблема описания переходной характеристики заключается в том, что обратное преобразование Лапласа от дробностепенной функции

вычислительными средствами осуществляется неявно [6]. В проектируемом программном обеспечении временные характеристики описаны числовыми рядами, полученными обратным преобразованием Фурье для несимметричных функций [7]. При таком методе описания, определение перерегулирования и времени управления становится неточным.

Взамен временных критериев качества, были рассмотрены запас по фазе АСУ, интегральное квадратичное отклонение и частотный коэффициент колебательности.

Запас по фазе – величина, описываемая выражением:

$$\Delta\Phi = |-180^\circ - \varphi(w_{A=1})|,$$

где  $\varphi(w_{A=1})$  – величина ФЧХ разомкнутой системы на частоте, на которой система имеет единичный коэффициент передачи. Оптимальным запасом по фазе принимается его величина, равная  $60^\circ$  [8].

При оптимизации по запасу по фазе исключаются случаи, когда работчику для достижения минимального времени установления необходимо жертвовать малым перерегулированием. Оценить величину перерегулирования можно с помощью частотного коэффициента колебательности (ЧКК).

ЧКК определяется как отношение максимальной величины АЧХ  $A(w_{\max})$  к ее величине на нулевой частоте работы системы  $A(0)$  [9]:

$$M = \frac{A(w_{\max})}{A(0)},$$

оптимальным значением является  $M$  от 1,3 до 1,5 [9]. ЧКК напрямую связан с перерегулированием, но не описывает времени установления переходного процесса, поэтому его необходимо применять в паре с другим критерием. Условия большого запаса по фазе и высокого ЧКК могут быть взаимоисключающими. Поэтому было принято решение использовать ЧКК в паре с интегральным квадратичным отклонением (ИКО):

$$ИКО = \int_0^{\infty} |g(t)|^2 * dt ,$$

где  $g(t)$  – импульсная характеристика системы. Квадратичная зависимость позволяет более точно оценить статическую ошибку немонотонного переходного процесса, а также время его установления, но не имеет прямой зависимости с перерегулированием.



На основе проанализированных данных была поставлена задача проверить и сравнить результаты оптимизации ФПИД-регулятора отдельно по запасу по фазе и по критериям ЧКК и ИКО совместно, а также выбрать подходящий критерий оптимизации.

### Описание эксперимента и результаты

Проверка производилась с помощью представленного в [3] программного обеспечения для двух объектов управления, описываемых выражениями:

$$W_o = \frac{95}{0,01 * s^2 + 0,485 * s + 1}, \quad (2)$$

$$W_o = \frac{1000}{0,001 * s^2 + 0,95 * s + 1}. \quad (3)$$

Результаты экспериментов для различных объектов представлены в табл. 1, 2, где  $K_d$ ,  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$  – коэффициенты управления в соответствии с выражением (1),  $h_{\max}$  – перерегулирование,  $t_{\text{пер}}$  – время установления,  $\Delta\Phi$  – запас по фазе. Графики полученных переходных процессов представлены на рис. 1 и 2.

**Таблица 1. Результаты оптимизации для объекта (2)**

Критерий оптимизации	$K_d$	$K_i$	$K_p$	$\delta$	$\lambda$	$h_{\max}$ , %	$t_{\text{пер}}$ , мс	$\Delta\Phi$ , град.
ЧКК и ИКО $M = 1$	1,145	0,054	0,347	0,958	0,453	14,4	0,6292	53,6
ЧКК и ИКО $M = 1,5$	0,499	0,001	0,520	0,935	0,294	31,53	0,6297	37,5
Запас по фазе (с-60)	32,58	0,025	1,367	0,744	0,892	26,9	0,6290	54,9

**Таблица 2. Результаты оптимизации для объекта (3)**

Критерий оптимизации	$K_d$	$K_i$	$K_p$	$\delta$	$\lambda$	$h_{\max}$ , %	$t_{\text{пер}}$ , мс	$\Delta\Phi$ , град.
ЧКК и ИКО $M = 1$	7,193	0,019	0,521	0,898	0,289	7,12	0,628	61,6
ЧКК и ИКО $M = 1,5$	42,47	0,022	0,352	0,972	0,920	25,42	0,629	51
Запас по фазе (с-60)	14,65	0,166	0,184	0,890	0,171	5	0,628	60

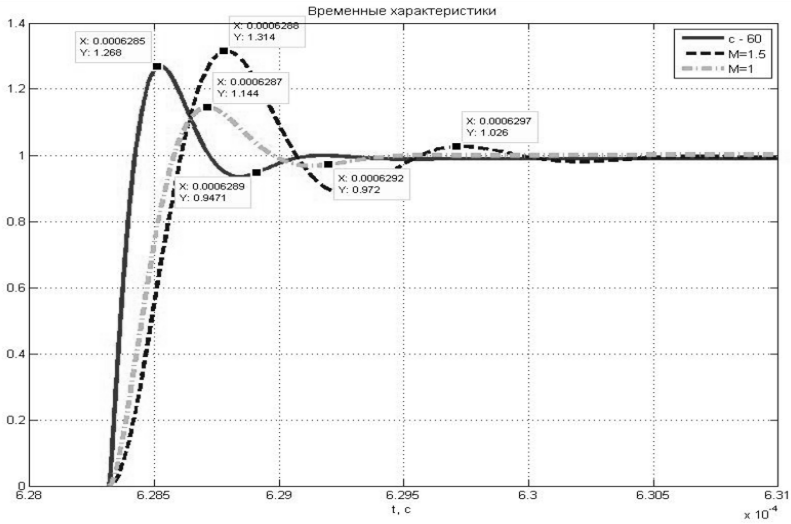


Рис. 1. Переходные процессы для САУ с объектом (2)

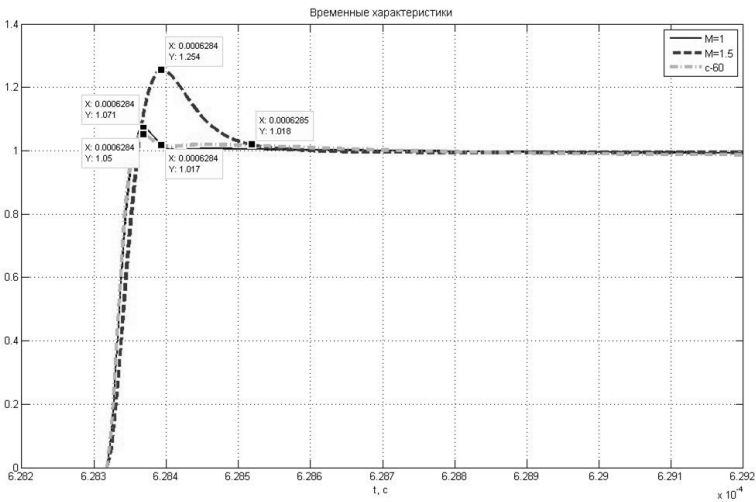


Рис. 2. Переходные характеристики САУ с объектом (3)

По результатам видно, что при оптимизации АСУ по запасу по фазе результаты могут получиться различные, как с большим перерегулированием – объект (2), так и с малым – объект (3).

При увеличении ЧКК уменьшается запас по фазе системы. В процессе анализа программного обеспечения были выявлены случаи, когда результатом оптимизации становилась нестабильная АСУ. При оптимизации по ЧКК, равным единице, запас по фазе примерно равен  $60^\circ$ .

### Выводы

С целью прямого контроля перерегулирования переходного процесса АСУ, а также с целью избежания получения нестабильных АСУ в результате оптимизации были приняты следующие решения:

1) основным критерием оптимизации выбрать критерии ЧКК и ИКО, причем ЧКК задается вручную пользователем программы, а ИКО выбирается как минимально возможное и много меньшее, чем для АСУ с классическим ПИД-регулятором;

2) ввести контроль результатов по запасу по фазе. В случае если запас по фазе результирующей АСУ получился менее  $30^\circ$ , программа сбрасывает результаты и перезапускает алгоритм.

Разработанный алгоритм позволяет быстро и точно определить коэффициенты регулирования ФПИД-регулятора, что значительно упрощает работу разработчика систем автоматического управления. А полученные результаты еще раз подтверждают необходимость дальнейших исследований в области схемотехники дробного порядка и проектировании перспективной элементной базы на базе R-C-NR-структур [2].

### Список литературы

1. Baboshkin, G. D., Dulesov, S., Ushakov, P. A. Fractional order PID-controller based on fractional impedance component / G. D. Baboshkin, S. Dulesov, P. A. Ushakov // Fifth Forum of Young Researchers : Proceedings (February 22, 2017, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2017. – Pp. 40–49.
2. Ушаков, П. А. Проектирование функциональных устройств микроэлектроники на основе резистивно-емкостных сред. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – 159 с.
3. Бабошкин, Г. Д. Оптимизация параметров ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма / Г. Д. Бабошкин, М. А. Подсизерцев, А. А. Бабошкина // Интеграция науки, общества, производства и промышленности : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (5 мая 2018 г., г. Казань). – В 2 ч. – Ч. 1. – Уфа : АЭТЕРНА, 2018. – С. 8–10.
4. Ермеев, А. В. Генетические алгоритмы и оптимизация : учеб. пособие. – Омск : Изд-во Омского гос. ун-та, 2008. – 48 с.
5. Неустроева, С. В. Критерий оптимальности и методы расчета параметров регулятора // Молодежь и наука : сб. материалов VI Всерос. науч.-техн.

конф. студентов, аспирантов и молодых ученых [Электронный ресурс]. – Красноярск : Сибирский федеральный ун-т, 2011. – С. 1–4.

6. *Oustaloup, A. Systemes Asservis Lineaires d'Ordre Fractionnaire: Theorie et Pratique.* – Paris, Editions Masson, 1983. – 272 p.

7. *Тептин, Г. М. Математическое моделирование : учеб.-метод. пособие / Г. М. Тептин, О. Г. Хуторова, А. А. Журавлев.* – Казань : Физический факультет Казанского гос. ун-та, 2009. – 22 с.

8. *Бесекеерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекеерский, Е. П. Попов.* – СПб. : Профессия, 2003. – 747 с.

9. *Попов, Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления.* – М. : Наука, 1979. – 249 с.

*G. D. Baboshkin*, postgraduate student

*M. A. Podsizertsev*, postgraduate student

*P. A. Ushakov*, DSc in engineering, associate professor

E-mail: [gbbaboshkin@rambler.ru](mailto:gbbaboshkin@rambler.ru)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Selection of ACS's Quality Control Criteria for Automatic Optimizing Fractional-Order PID Controller's Parameters**

*The article considers the problem of the lack of methods for calculating the control coefficients of a fractional-order PID controller. As a solution to the problem, special software is offered to calculate the control coefficients using a genetic algorithm. The article presents an analysis of quality control criteria of automatic control systems and the selection of the most suitable criteria as the objective function of the genetic algorithm. The results of the automated control system optimization for the phase margin criteria, frequency coefficient of oscillation and the integral quadratic deviation are presented. The final decision of multicriteria estimation of ACS optimization results is presented.*

**Keywords:** automatic control system, fractional PID controller, frequency coefficient of oscillation, integral quadratic deviation, optimization, genetic algorithm, phase margin.

---

УДК 681.326.7

*Р. И. Зямилов*, магистрант

E-mail: nash96@bk.ru

*В. А. Стародубцева*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: starodubceva\_v\_a@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Система погодного регулирования отопления «умного дома» на базе микроконтроллера AVR**

Рассмотрены вопросы применения погодного регулирования систем отопления в доме с целью экономии топлива и повышения комфорта в доме. Проанализированы представленные на рынке системы, приведено их сравнение. Предложена разработанная схема реализации погодного регулирования на базе микроконтроллера AVR, не уступающая готовым системам и отличающаяся низкой ценой по сравнению с ними.

**Ключевые слова:** микроконтроллер, AVR, «умный дом», система отопления, погодозависимое регулирование, контроллер, Atmega 8.

### **Введение**

Система домашней автоматизации «умный дом» обладает сложной комплексной структурой. Она обычно объединяет в себе отдельные подсистемы, каждая из которых выполняет свою функцию: управление освещением, климатом, безопасностью и др. Имеются примеры использования погодного регулирования в многоквартирных домах. Пример схемы погодного регулирования в многоквартирном доме изображен на рис. 1 [5].

Принципы регулирования в «умном доме» схожи с принципами регулирования в многоквартирных домах. Рассмотрим процесс погодного регулирования. Датчик наружного воздуха (выведенный на теневую сторону улицы) измеряет уличную температуру. Два датчика на подающем и обратном трубопроводе измеряют температуру теплосети. Логический программируемый контроллер вычисляет необходимую дельту и, управляя клапаном, регулирует скорость потока теплоносителя. С целью защиты от полного перекрытия в клапане предусмотрена защита. Для предотвращения застоя стояков (попадания воздуха) насос внутренней циркуляции циркулирует теплоноситель в системе через обратный клапан. Узел погодного регулирования также оборудован ав-

томатическим воздухоотводчиком. Эти же принципы погодного регулирования могут быть использованы в «умном доме».

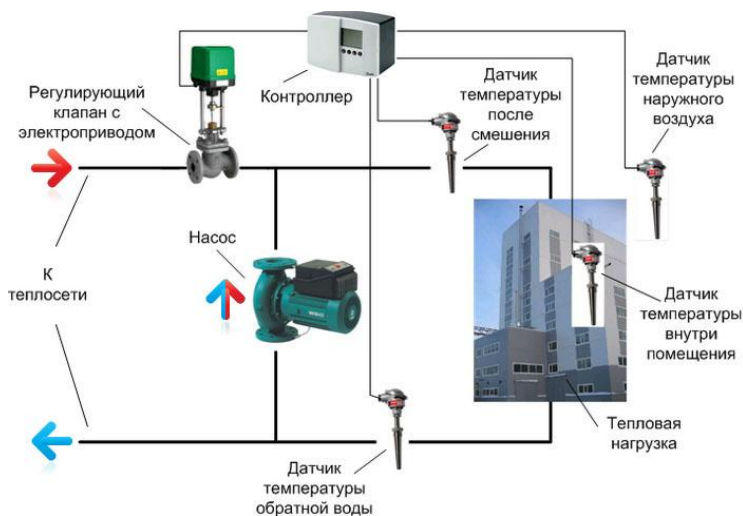


Рис. 1. Схема погодного регулирования многоквартирного дома

В статье [1] был проведен анализ возможности использования микроконтроллера AVR для управления «умным домом». Целью настоящей работы является разработка системы погодного регулирования, реализованной на микроконтроллере AVR.

Для «умного дома» отопление играет едва ли не определяющую роль в создании комфортных условий, и от его организации во многом зависят затраты на его содержание. Система отопления может включать в себя отопление от радиаторов и теплый пол. В данной статье рассматривается только регулирование температуры радиаторов, без управления теплым полом, так как это приведет к удорожанию проекта.

### Обоснование реализации погодного регулирования в доме

На данный момент существуют различные, а порой даже противоречивые мнения по поводу необходимости применения погодозависимого регулирования в системе водяного отопления частного дома. Действительно, на сегодняшний день практически во всех сферах человеческой жизнедеятельности мы можем встретить системы автоматизации, которые призваны оптимизировать тот или иной процесс. Однако возникает вопрос об их целесообразности.

Определим, какие функции призвана выполнять автоматика системы погодного регулирования. Выделим две основные:

- обеспечение максимально комфортных условий проживания;
- экономия топлива и уменьшение инерционности работы системы;
- повышение ее эффективности;
- обеспечение дополнительного снижения затрат на содержание.

Для обеспечения оптимальной температуры воздуха внутренних помещений используется целый комплекс инженерных решений, и погодная автоматика является одной из существенных составляющих этого комплекса. Дело в том, что за параметры микроклимата, как правило, отвечают комнатные термостаты, работающие по датчикам температуры внутреннего воздуха и обеспечивающие непосредственную регулировку системы отопления. Однако применение одних лишь термостатов (при сугубо автоматическом режиме) не совсем оправдано, так как всегда имеется инерционность системы отопления. Влияние всех вышеперечисленных факторов приводит к тому, что система начинает работать в прерывистом импульсном режиме с периодическим запозданием. Здесь на помощь приходит та самая погодозависимая автоматика, включающая в себя контроллер, который по датчику температуры наружного воздуха будет постоянно корректировать температуру теплоносителя и обеспечивать необходимые параметры [2].

В статье [2] с рядом допущений произведен расчет, показывающий экономию от использования погодного регулирования. Таким образом, погодозависимая автоматика является вполне оправданной мерой, которая позволяет не только повысить степень комфорта для проживающих, но и сэкономить существенное количество денежных средств.

### **Анализ рынка готовых устройств**

На сегодняшний день имеется множество компаний, предлагающих системы погодного регулирования для водогрейных котлов. Такие системы включают в себя три основных компонента: контроллер, наружный датчик температуры, комнатный термостат. Рассмотрим модели, наиболее популярные в России на данный момент. Для удобства сравнение моделей представим в виде таблицы. Стоит отметить, что рассматриваются только контроллеры, без внешних устройств, т. е. без комнатных термостатов и уличных датчиков температуры.

Сравнение моделей контроллеров представлено в таблице. По функционалу они абсолютно идентичны, разница только в количестве возможных подключаемых контуров отопления. Как видно из таблицы, стоимость самого дешевого контроллера – 11408 руб. без учета термодатчиков. Цена – это единственный минус готовых контроллеров.

**Сравнение моделей контроллеров для погодного регулирования**

Производитель, модель	Описание	Цена, руб.
Vailant CalorMATIC 470	Позволяет управлять работой котельной исходя из температуры воздуха снаружи благодаря специальному датчику наружной температуры. Таким образом, достаточно лишь один раз настроить работу регулятора, и вам будет обеспечена постоянная комфортная температура в помещении. Они обеспечивают наиболее эффективное и экономичное управление работой котла. Оснащенные дополнительными модулями, регуляторы отопления Vailant способны поддерживать комплексные отопительные системы, включающие в себя до 12 дополнительных отопительных контуров	17000
Salus WT100	Погодозависимый терморегулятор Salus WT100 предназначен для регулирования температуры в смесительном контуре с 3 или 4-ходовым клапаном, имеющим сервопривод с 3-точечным управлением, с возможностью подключения дополнительного насоса и переключения источника тепла с помощью беспотенциального контакта (клеммы COM-NO), который управляет работой источника тепла (ВКЛ / ВЫКЛ)	11408
Watts	Погодозависимый контроллер, поддерживающий оптимальную температуру в помещении путем регулирования температуры воды в подающем трубопроводе автономной системы отопления с учетом уличной температуры. 9 заводских и 4 пользовательские программы. Контроль работы насоса и возможность подключения комнатного термостата. Контроль насоса через свободные контакты, контроль подмешивающего клапана через 32 триака 75 Вт, 230 В	15138

**Система погодного регулирования на базе микроконтроллера AVR**

Целью данной работы является создание устройства, позволяющего в автоматическом режиме поддерживать постоянную температуру в помещении в зависимости от уличной температуры.

Основной состав схемы – это микроконтроллер AVR Atmega-8 в корпусе TQFP-32, ЖК-индикатор и микросхема 556. Задача схемы – следить за температурой в помещении. Датчик U-1 – если температура ниже определенного значения – 23,3 °С, котел всегда включится на обогрев.

Датчик U-2 – по температуре наружного воздуха происходит периодическое включение котла с изменяемыми периодами паузы и отдельно



периоды включения котла благодаря микросхеме 556. В данной схеме роль таймеров IC1, IC2 очень важна – таймеры определяют периоды включения котла и периоды пауз. Датчик U-3 установлен на вводе теплоносителя в котел, так называемая обратка, при превышении температуры 37,0 °С котел получит команду на отключение. Данные от U-3 имеют приоритет над IC2 и над данными от U-1. Часть схемы с фоторезистором вносит условие в работу микроконтроллера: день и ночь, это дает смещение температурного графика на 2 °С днем по всему температурному диапазону. То есть днем в сторону увеличения периода паузы IC1 и уменьшения периода включения таймера IC2.

В среде моделирования Proteus была проверена и отлажена работа данного устройства. При моделировании наблюдалась стабильная и правильная работа устройства. Схема устройства изображена на рис. 2.

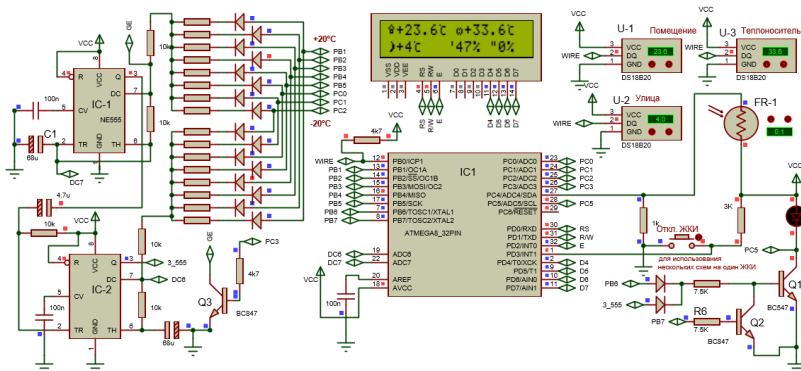


Рис. 2. Схема предлагаемого устройства

## Выводы

Представленное устройство по функционалу, т. е. по тем функциям, которые они выполняют, а именно регулирование температуры помещения в зависимости от наружной температуры, не уступает готовым системам погодного регулирования. Оно позволяет так же поддерживать комфортную температуру в помещении, как и готовые системы. Отличительным параметром данного устройства является его цена, которая ввиду использования отечественных элементов, а также принадлежности какому-либо бренду позволяет в разы снизить стоимость данного устройства. Самыми дорогими элементами устройства являются микроконтроллер и ЖКИ-дисплей стоимостью 130 и 270 руб. соответственно.

### Список литературы

1. *Зямилов, Р. И.* Анализ возможности использования микроконтроллеров AVR для управления «умным домом» / Р. И. Зямилов, В. А. Стародубцева // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.). – Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 431–436.
2. *Бобров, А. А.* Преимущества погодозависимого регулирования системы отопления загородного дома [Электронный ресурс] // VALTEC, Россия [Сайт]. – URL: [https://valtec.ru/document/article/preimushhestva\\_pogodozavisimogo\\_regulirovaniya\\_sistemy\\_otopleniya\\_zagorodnogo\\_doma.html](https://valtec.ru/document/article/preimushhestva_pogodozavisimogo_regulirovaniya_sistemy_otopleniya_zagorodnogo_doma.html) (дата обращения: 12.06.2018).
3. Автоматизация отопления дома на AVR [Электронный ресурс] // GrakovNe [Сайт]. – URL: <https://old.grakovne.org/automatization-warming-home-by-avr/> (дата обращения: 09.06.2018 г.).
4. Как уменьшить большой расход газа котлом на отопление дома [Электронный ресурс] // ДомЭконом [Сайт]. – URL: <https://domekonom.su/kak-umenshit-bolshoj-rashod-gaza-kotlom-na-otoplenie-doma> (дата обращения: 04.06.2018 г.).
5. Система погодного (климатического) регулирования многоквартирных многоэтажных домов (ЖКХ) [Электронный ресурс] // ВНТ [Сайт]. – URL: <http://sovintervod-vnt.ru/avtomatizirovannye-teplovye-punkty/sistema-pogodnogo-klimaticheskogo-regulirovaniya-mnogokvartirnyx-nogoetazhnyx-domov-zhkh/> (дата обращения: 29.05.2018).

*R. I. Zyamilov*, master student

E-mail: nash96@bk.ru

*V. A. Starodubceva*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: starodubceva\_v\_a@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation

### **The System of Weather Regulation of Heating the "Smart Home" Based on the AVR Microcontroller**

*The questions of application of weather regulation of heating systems in the house, with the purpose of fuel economy and increase of comfort in the house are considered. Finished systems are analyzed, their comparison is given. The author presents his own scheme for realizing the weather regulation based on the AVR microcontroller.*

**Keywords:** microcontroller, AVR, smart home, heating system, weather-compensated control, controller, Atmega 8.

---

УДК 629.3.054.24

*В. А. Куликов*, д-р техн. наук, проф.

*К. А. Никитин*, канд. техн. наук, ст. преп.

E-mail: kulik000@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Малогабаритный малоинерционный термопреобразователь сопротивления для систем сбора информации**

*Предложен малогабаритный термопреобразователь сопротивления, представляющий собой трубку из нержавеющей стали, на внутреннюю поверхность которой уложен слой медного микропровода чувствительного элемента. За счет малой общей теплоемкости и малого термического сопротивления между чувствительным элементом и трубкой обеспечивается малая инерционность термопреобразователя при помещении его в исследуемую среду.*

**Ключевые слова:** измерения температуры, термопреобразователь сопротивления, медный чувствительный элемент, малая инерционность термопреобразователя.

### **Введение**

Термопреобразователи сопротивления (ТПС) с металлическими, например, платиновыми, чувствительными элементами широко используются в технике для измерения температуры в диапазоне от  $-200$  до  $+850$  °С. Применяются также медные чувствительные элементы, обладающие в более узком диапазоне (от  $-30$  до  $+150$  °С) линейной функцией преобразования.

Известная конструкция ТПС [1] содержит корпус в виде трубки и помещенные в него чувствительный элемент в виде катушки провода с каркасом, изолятор и электрические выводы чувствительного элемента. Теплопроводящий наконечник корпуса находится в тепловом контакте с каркасом, при этом катушка намотана на каркас в несколько слоев, изолятор присоединен к каркасу через переходный цилиндр и выполнен в виде пластины с контактными площадками, на которых выводы катушки провода чувствительного элемента электрически соединены с выводами ТПС. Наконечник корпуса выполнен как единое целое с каркасом.

Как показывают эксперименты, недостатками такой конструкции являются низкая надежность вследствие электрического замыкания витков катушки на корпус в условиях вибраций и большая погрешность измерения температуры, обусловленная саморазгревом чувствительного

элемента под действием измерительного тока за счет большого термического сопротивления между верхними слоями катушки и корпусом.

Применяется в технических измерениях также конструкция ТПС [2], которая содержит корпус в виде трубки с теплопроводящим наконечником корпуса, помещенные в нее чувствительный элемент в виде катушки провода с каркасом, изолятор с контактными площадками, электрические выводы термопреобразователя и диэлектрическая теплопроводящая трубка.

Недостатками конструкции являются низкая точность измерения температуры вследствие саморазогрева чувствительного элемента измерительным током и большое время установления температуры термопреобразователя ввиду большой общей теплоемкости, а также низкая надежность термопреобразователя, обусловленная перемещениями витков катушки и электрическим замыканием между ними в условиях вибраций.

### **Обоснование конструкции малогабаритного малоинерционного термопреобразователя сопротивления**

Методом электротепловой аналогии производилось компьютерное моделирование [3] ТПС известных конструкций с внутренним каркасом чувствительного элемента и бескаркасных. Установлено, что инерционность таких ТПС обусловлена как значительной теплоемкостью внутренних элементов конструкции, так и большим (до 50 К/Вт) термическим сопротивлением «чувствительный элемент – корпус».

Радикальным способом снижения термического сопротивления «ЧЭ-корпус» ТПС является отказ от использования каркаса и размещение однослойной катушки непосредственно на внутренней поверхности защитной трубки. Моделирование такой конструкции на упрощенной электрической модели, представленной на рис. 1 и содержащей две ячейки, соответствующие фрагменту трубки и фрагменту катушки ЧЭ длиной 1 мм, показало следующие результаты. Если использовать трубку из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,15 мм и внутренним диаметром 2,7 мм, на внутренней поверхности которой размещена однослойная катушка из микропровода диаметром 0,04 мм, то общее термическое сопротивление ТПС снижается примерно до 1,5 К/Вт, при этом существенно уменьшаются саморазогрев до 3 мК при температуре 100 °С и показатель тепловой инерции до единиц секунд.

Однако необходимо отметить, что создание подобного ТПС сопряжено со значительными трудностями, как в плане конструирования, так и в плане технологии его изготовления. Главные проблемы состоят в

том, каким образом закрепить катушку на внутренней поверхности трубки и каким образом обеспечить сборку малогабаритного ТПС.

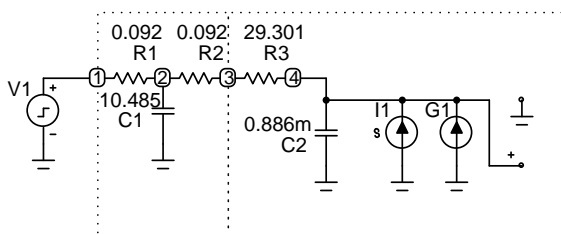


Рис. 1. Электротепловая модель ТПС бескаркасной конструкции

Предложена конструкция ТПС, максимально приближенная к идеальной [4].

Термопреобразователь выполнен в виде многослойной трубки, состоящей из прилегающих друг к другу внешнего металлического слоя и двух внутренних диэлектрических слоев, на ограниченном по длине участке которой между диэлектрическими слоями расположена однослойная катушка микропровода чувствительного элемента. При этом концы катушки через отверстия во внутреннем диэлектрическом слое или через отверстия в металлическом и внешнем диэлектрическом слое выведены соответственно внутрь трубки или наружу для присоединения к выводам термопреобразователя.

### Технология изготовления и конструкция термопреобразователя сопротивления

ТПС изготавливается путем намотки катушки провода на диэлектрическую трубку, причем перед намоткой катушки диэлектрическую трубку удлиняют вытягиванием вдоль оси до диаметра, меньшего внутреннего диаметра металлической трубки, после намотки производят защиту провода катушки электроизолирующим слоем, диэлектрическую трубку помещают внутрь металлической трубки и производят нагрев всей конструкции до момента сжатия диэлектрической трубки. При этом за счет увеличения диаметра диэлектрической трубки при сжатии она вместе с катушкой и электроизолирующим слоем плотно прилегает к металлической трубке, образуя единую многослойную конструкцию (рис. 2, а, б).

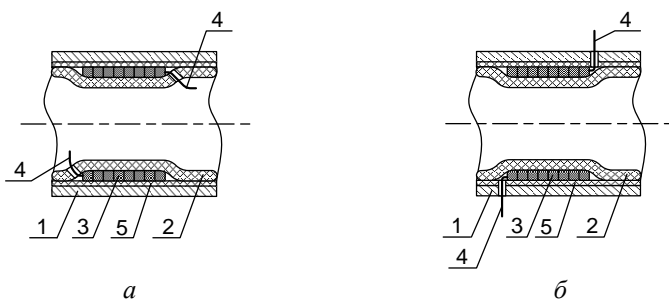


Рис. 2. Малогабаритные малоинерционные ТПС

ТПС содержит многослойную трубку, состоящую из внешнего металлического слоя 1, внутреннего диэлектрического слоя 2, на который намотана катушка чувствительного элемента 3 из изолированного провода с концами 4, и электроизолирующего слоя 5, нанесенного поверх катушки чувствительного элемента 3 и внутреннего диэлектрического слоя 2.

ТПС (рис. 2, а) работает следующим образом.

Путем погружения ТПС вводится в исследуемую среду. Через катушку 3 чувствительного элемента пропускается измерительный ток. За счет мощности тока происходит выделение тепла в катушке. От катушки чувствительного элемента тепло отводится в радиальном направлении через электроизолирующий слой 5 и металлический слой 1 в среду. Тепло также отводится в среду через внутренний диэлектрический слой 2 в обход катушки 3, который за пределами катушки плотно прилегает к электроизолирующему 5 и металлическому 1 слоям. Благодаря малому термическому сопротивлению между катушкой 3 и металлическим слоем 1 термопреобразователя и малой его общей теплоемкости обеспечиваются снижение погрешности измерений температуры за счет саморазогрева измерительным током и времени установления его температуры.

Конструкция термопреобразователя обеспечивает фиксацию витков катушки 3 чувствительного элемента между диэлектрическим 2 и электроизолирующим 5 слоями, что исключает перемещение витков и межвитковые электрические замыкания в условиях вибраций и, в свою очередь, обеспечивает повышение надежности термопреобразователя.

В варианте конструкции на рис. 2, б) термопреобразователь сопротивления предназначен для измерения температуры жидкости, транспортируемой по трубопроводу. При этом многослойная трубка термопреобразователя с катушкой 3 чувствительного элемента устанавливается в разрыв трубопровода, и транспортируемая жидкость пропускается через нее. Выделяющаяся в катушке 3 в виде тепла мощность при протекании изме-

рительного тока отводится через внутренний диэлектрический слой 2 в транспортируемую жидкость и через изолирующий 5 и металлический 1 слои за пределы трубки в окружающую среду.

### Экспериментальные исследования термопреобразователя

Для экспериментальных исследований было изготовлено 10 экземпляров ТПС, выполненных по варианту рис. 2, а.

В качестве защитной металлической трубки использовалась медицинская игла из нержавеющей стали с внешним диаметром 3 мм и толщиной стенки 0,15 мм. В качестве внутреннего диэлектрического элемента применялась трубка из фторопласта с исходным внешним диаметром 3,5 мм, вытянутая перед намоткой на нее медного микропровода ПЭТР-150 диаметром 0,04 мм до диаметра 2 мм. При этом для электрической изоляции катушки от металлической защитной трубки поверх не накладывалась изоляционная фторопластовая лента ФУМ толщиной 0,05 мм. После намотки катушки в один слой виток к витку и защиты лентой ФУМ она вводилась внутрь металлической трубки, и далее вся конструкция помещалась в термостат для отжига при температуре 120 °С. После отжига в течение 1 часа конструкция вынималась и охлаждалась на воздухе при комнатной температуре.

Было установлено, что фторопластовая внутренняя трубка плотно прилегает к внутренней поверхности металлической трубки и даже при значительных усилиях не извлекается из нее.

Исследования метрологических свойств ТПС нового типа производились с использованием прецизионного жидкостного термостата переливания «Термотест 100», погрешность установки температуры рабочей жидкости которого не превышает 0,02 К. Для измерения сопротивления чувствительного элемента ТПС использовался также прецизионный измерительный прибор «Теркон» с погрешностью измерений, пересчитанной на температуру, не превышающей 0,01 К.

По результатам экспериментов установлено, что все экземпляры ТПС имеют близкое к номинальному начальное электрическое сопротивление  $50 \pm 2$  Ом (при температуре 0 °С). Функция преобразования одного из экземпляров ТПС приведена на рис. 3.

Как видно, начальное сопротивление ТПС составляет 48,663 Ом, а температурная чувствительность 0,205 Ом/К, что соответствует показателю  $W_{100}$  – отношению сопротивлений при температурах 100 и 0 °С – 1,421 единиц. Нормативными документами [5] допускается применение ТПС с  $W_{100}$  не менее 1,426 единиц. Поэтому были проведены дополнительные исследования, которые показали, что снижение показателя связано с остаточными напряжениями в микропроводе чувствительного

элемента, возникающими при увеличении диаметра фторопластовой трубки, на которой он уложен, при нагревании.

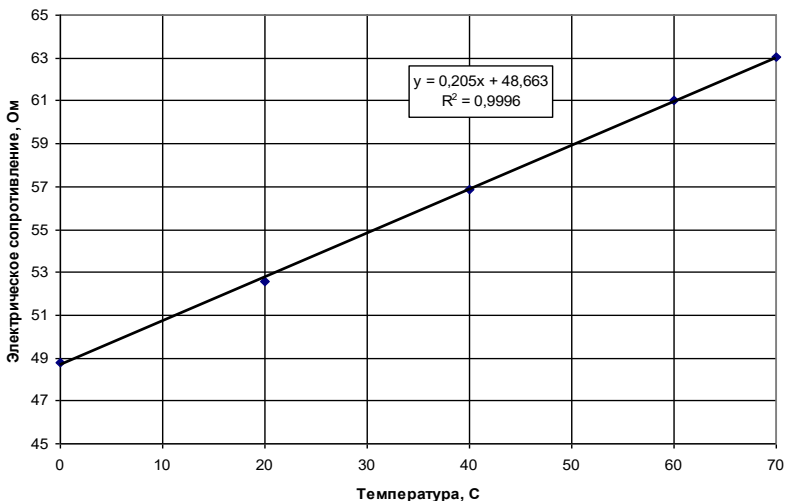


Рис. 3. Функция преобразования экспериментального ТПС

Был произведен повторный отжиг ТПС в термостате при температуре 150 °С. В результате произошла релаксация напряжений в проводе чувствительного элемента, и значение показателя  $W_{100}$  возросло до 1,427 единиц, что соответствует требованиям нормативных документов.

Исследовалась инерционность ТПС нового типа путем его резкого погружения в жидкость термостата «Термомест 100» с температурой 100 °С при исходной температуре 22 °С. Установлено, что постоянная времени нарастания температуры ТПС, определяемая по уровню 0,63 от перепада, составляет 5 секунд. Это значение в 4–5 раз меньше постоянной времени ТПС известных конструкций.

### Заключение

Проведен анализ конструкций и свойств известных термопреобразователей сопротивления с металлическими чувствительными элементами. Выявлены их недостатки, в частности высокая инерционность, относительно низкая надежность и относительно высокое значение погрешности измерений температуры за счет саморазогрева ТПС измерительным током.

Предложена конструкция термопреобразователя нового типа, в которой однослойная катушка из медного микропровода примыкает к внут-



ренной поверхности защитной металлической трубки. При этом в конструкции отсутствует внутренний каркас катушки. Конструкция обеспечивает минимальные значения теплоемкости внутренних элементов и термического сопротивления («чувствительный элемент – корпус»). В результате в малогабаритном исполнении достигнуто снижение инерционности ТПС при проведении температурных измерений в 4–5 раз, а также за счет фиксации витков катушки чувствительного элемента между двумя диэлектрическими слоями повышена надежность конструкции при работе в условиях вибраций. Снижена погрешность измерений температуры.

### Список литературы

1. Пат. 58703 Российская Федерация, МПК G01K 7/16. Термопреобразователь сопротивления / Куликов А. В., Сяктерев В. Н., Вавилов А. Ю. – № 2006117260/22 4 ; заявл. 19.05.2006 ; опубл. 27.11.2006, Бюл. № 33.
2. *Сяктерева, В. В.* Разработка зондовых методов измерения теплопроводности грунта на основе термопреобразователей сопротивления : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2011. – 24 с.
3. *Кузьмин, М. П.* Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М. : Энергия, 1974. – 416 с.
4. Пат. 2533755 Российская Федерация, МПК G01K7/00. Термопреобразователь сопротивления (варианты) и способ его изготовления / Куликов В. А., Никитин К. А., Рогожников М. А. – № №2013122973 ; заявл. 20.05.2013 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32.
5. Температурные измерения / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина и др. – Киев : Наук. думка, 1989. – 704 с.

V. A. Kulikov, DSc in engineering, professor

K. A. Nikitin, CSc, senior lecturer

E-mail: kulik000@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Small-Size Low-Inertia Thermal Resistance Transducer for Data Acquisition Systems

*A small-sized thermal resistance transducer is proposed as a stainless steel tube, on the inner surface of which a layer of copper microwire of the sensing element is laid. The low total heat capacity and low thermal resistance between the sensing element and the tube provide a small inertia of the thermal transducer when it is placed in the test medium.*

**Keywords:** temperature measurement, resistance thermal transducer, copper sensing element, low inertia of thermal transducer.

УДК 004.896(045)

А. А. Миронов, студент  
E-mail: Nomanyash@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Комплекс систем для высокоэффективной беспроводной автономной зарядки беспилотных летательных аппаратов**

*У БПЛА есть существенный недостаток – длительность автономной работы. Он значительно ограничивает возможность их функционирования. Статья посвящена созданию комплекса систем, который позволит решить эту проблему. В ней будет рассмотрена система автономного взлета/посадки, высокоэффективная беспроводная зарядка и зарядочная платформа.*

**Ключевые слова:** беспроводная зарядка, БПЛА, зарядочная платформа, автономная работа, дрон.

### **Введение**

В последние годы все больше и больше работы выполняют беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Осмотр нефте- и газопроводов, слежение за территорией, помощь в работе пожарных и полицейских, транспортировка различных вещей и т. д. Но у них есть единственный минус – они не автономны в полной мере. Их можно запрограммировать на выполнение какой-либо задачи, которую они будут постоянно выполнять. Но все это будет происходить лишь до времени разрядки батареи. А у БПЛА есть значительный недостаток – время работы. Из-за своих компактных размеров они не могут себе позволить крупный аккумулятор, вследствие чего их среднее время работы составляет около 15–30 мин. И к тому же зарядка требует человеческого вмешательства, что ограничивает автономность работы БПЛА. Проблема в создании беспроводной автономной зарядки для БПЛА заключается в том, что сложно приземлить дрон точно на зарядочную платформу без человеческого управления. Вторая сложность – это вес. Используя индуктивную зарядку, нельзя снабдить дрон множеством принимающих элементов (катушек) для увеличения эффективности зарядки. И третья – даже посадив дрон на зарядочную площадку, нужно обеспечить большую точность его местоположения с расположением передатчика энергии (передающие катушки), т. к. небольшое смещение между передающей ка-

тушкой зарядочной станции и принимающей катушкой дрона ведет к высоким потерям, а следовательно, к снижению эффективности.

### Постановка задачи

Эта задача может быть решена путем создания автономной зарядки для беспилотных летающих средств, которая будет подразделена на три сегмента: 1 – создание системы автономного вертикального взлета и посадки, контролирующей движение дрона при помощи камер и GPS, 2 – создание облегченных и уменьшенных элементов беспроводной зарядки и оснащение ими БПЛА, 3 – создание высокоэффективной зарядочной платформы с подвижным зарядочным модулем и системы питания платформы энергией.

### Система автономного вертикального взлета и посадки

Огромное количество беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые в настоящее время находятся в эксплуатации, не имеют возможности выполнять автономные взлеты и посадки. Для этой цели используется пилот. Обычно это делается для снижения рисков и сложности и для уменьшения стоимости. Но эксплуатационный опыт показал, что во многих случаях повреждение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и его груза связано с человеческой ошибкой. Кроме того, для обучения пилота подходящим навыкам и приобретению достаточного опыта для осуществления взлетов и посадок БПЛА требуется несколько лет и значительные финансовые вложения. Поэтому более рационально будет использование автоматической системы взлета и посадки БПЛА. На рис. 1 показан БПЛА и его оснащение.



Рис. 1. Внешний вид и оснащение БПЛА

### Принцип действия системы

При недостаточном уровне зарядки батареи БПЛА начинает искать ближайший зарядный модуль. Затем при помощи координат GPS начинается движение к этой платформе на достаточно большой высоте, т. е. точность GPS  $\pm 10$  м. При близком подлете к цели управление дроном начинает регулироваться командами, основанными на изображении, даваемом камерой. Она передает изображение, на котором находится зарядная платформа. Для повышения скорости работы программа выделяет высокой точностью изображения лишь область около маркера на платформе [3]. Определив размер цели как долю пикселей в изображении, с мишенью известного размера можно найти параметр, который преобразует данные с камеры в расстояние до мишени и ее положения. Основываясь на местоположении этого маркера, дрон начинает спускаться, корректируя свое движение, сопоставляя положение маркера на платформе с его шаблонным изображением в системе [6]. Принцип обратной связи корректировки движения дрона показан на рис. 2 [8].

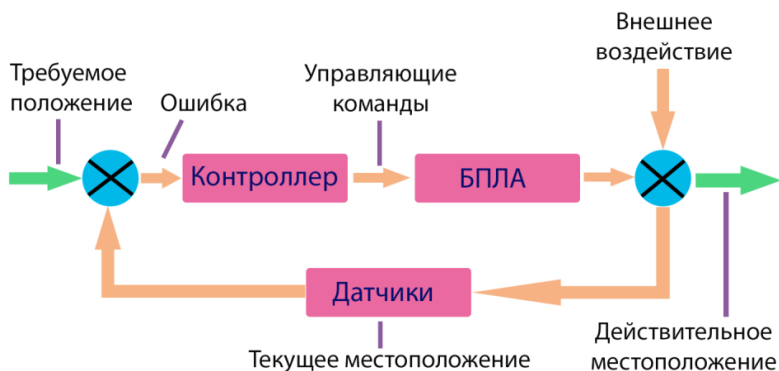


Рис. 2. Регулирование местоположения с использованием обратной связи

При успешной посадке срабатывают датчики в платформе и двигатели отключаются, если же сел не совсем точно – команда для взлета дрона на некоторую высоту и его вторичную посадку (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема работы системы приземления с учетом варианта неудачного приземления

*Контроль движения, основанный на изображении камеры*

БПЛА парит над платформой так, чтобы характерный маркер был в центре изображения камеры. Управляющие команды дрона выглядят так:

$$v = [v_\phi v_\theta]^\top, \tag{1}$$

где  $v_\phi$  и  $v_\theta$  описывают крен (поворот объекта вокруг его продольной оси и тангаж (т. е. угловое движение относительно горизонтальной поперечной оси инерции) соответственно). Их значения находятся в диапазоне от  $-1$  до  $1$ . Так как горизонтальное положение дрона уже учитывается встроенным гироскопом, угол наклона относительно горизонта будет постоянен, и его можно не учитывать в расчетах.

Переменная, характеризующая состояние позиции характерного маркера в рамке изображения камеры, может быть вычислена так:

$$p_i = [x_i y_i]^\top, \tag{2}$$

где  $x_i$  и  $y_i$  обозначают соответственно горизонтальные и вертикальные координаты маркера в рамке изображения и измеряются в пикселях (рис. 4).

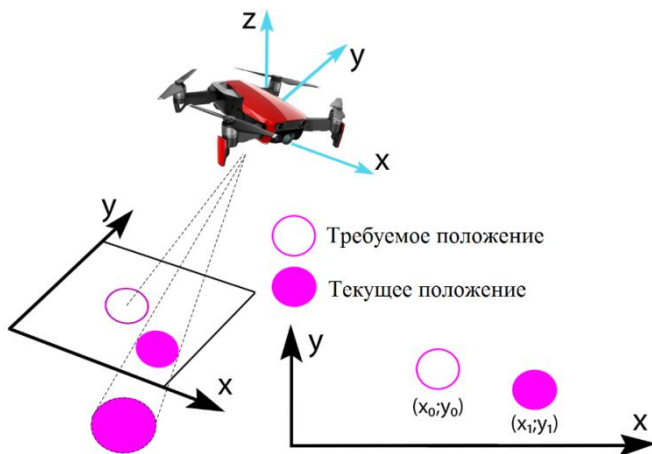


Рис. 4. Координатное представление характерной метки и текущего положения дрона

Главная задача системы посадки – сохранять характерный маркер в центре рамки изображения, для того чтобы дрон плавно и точно приземлялся на зарядочную платформу. Соответственно, исходное состояние и состояние ошибки описываются следующим образом:

$$p_0 = [x_0 y_0]^T, \quad (3)$$

$$p_e = p_0 - p_i, \quad (4)$$

где  $x_0$  и  $y_0$  – это центр координат рамки изображения (рис. 3). Тогда PID-контроллер выполняет функцию отслеживания цели:

$$\dot{v} = K_p p_e + K_d \dot{p}_e, \quad (5)$$

где  $K_p$  и  $K_d$  – это диагональные матрицы  $2 \times 2$  коэффициентов усиления, представляющие пропорциональный и дифференциальный коэффициент усиления соответствующих состояний. Эти усиления настроены для наилучшего управления отслеживания цели [1]. Движение БПЛА корректируется положением между целью на платформе и дроном, и малейшее отклонение от курса сразу же измеряется системой обработки изображения и передается в PID-контроллер, образуя обратную связь. Дрон выравнивает свое местоположение с маркером на платформе и парит над ним. Затем он начинает постепенно снижаться и

корректировать свою траекторию путем слежения за расположением маркера и поддерживая это положение. Когда он спустится на высоту около 20 см от платформы, система позволит начать дрону посадку – более быстрое снижение без учета местоположения характерного маркера. Для определения высоты используется сонар.

### Облегченные и уменьшенные элементы беспроводной зарядки

Эффективность передачи энергии в беспроводной зарядке определяется коэффициентом связи  $K$ . Он зависит от взаимной ориентации передающей и принимающей катушек, а также от расстояния между ними. Чем больше расстояние между катушками, тем менее эффективна система. Кроме того, эффективность зависит от резонансной частоты, относительных размеров передающей и принимающей катушек, коэффициента связи, сопротивления обмоток, наличия скин-эффекта, паразитных связей и ряда других факторов. Смещение по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , а также наличие угла наклона между катушками приводит к существенному росту потерь и, соответственно, к снижению эффективности передачи энергии.

Но можно достичь практически той же эффективности передачи, имея очень маленький коэффициент связи, и к тому же маленького размера и веса системы. Это осуществимо с помощью двухконтурной беспроводной передачи энергии с сильно резонансными катушками индуктивности [4]. Как она работает:

*Описание системы и ее математические параметры*

Вдобавок к существующей резонансной LC-цепи, в этом методе используется еще два добавочных индуктора, по одному на каждой стороне (рис. 5).

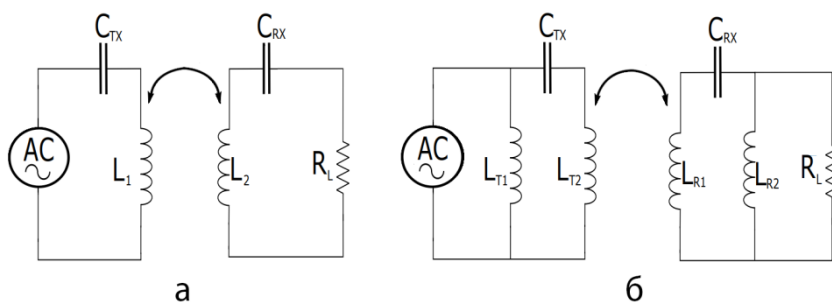


Рис. 5. Конструктивное сравнение обычной индуктивной зарядки (а) и предложенной новой системой (б)

В передатчике и в приемнике новый индуктор LT2 включается параллельно к LC-генератору и создает новую LCL-схему. Эти две новые схемы представляют собой генераторы, устанавливающие частоту колебаний, на которой передача энергии будет максимальной.

Эффективность передачи энергии и расстояние, на котором система достигает максимальной эффективности, строго зависят от геометрических параметров витков, которые вычисляются следующим образом:

$$M_{xy} = M_{yx} = \frac{\mu_0 r_y^2 r_x^2 \pi}{2\sqrt{(r_x^2 + d^2)^3}}, \quad (6)$$

где  $r_y$  и  $r_x$  – радиусы принимающей и передающей катушки;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $d$  – расстояние между двумя катушками.

Однако, как показано в вышеупомянутой формуле, внутренний диаметр витков может быть любым, не влияя на результат. При уменьшении внутреннего диаметра витков коэффициент связи между приемником и передатчиком останется тем же. Дополнительные витки  $L_{T1}$ ,  $L_{R2}$  имеют диаметр около 2 мм, но они не влияют на взаимную индукцию основных витков передатчика и приемника.

Используя такую систему максимальная эффективность передачи достигается при коэффициенте связи  $K = 0,01–0,05$  (рис. 6), что позволит осуществлять передачу энергии на относительно большом расстоянии для беспроводных типов зарядки и передачу энергии через небольшую преграду – плоскость посадочной платформы [7].

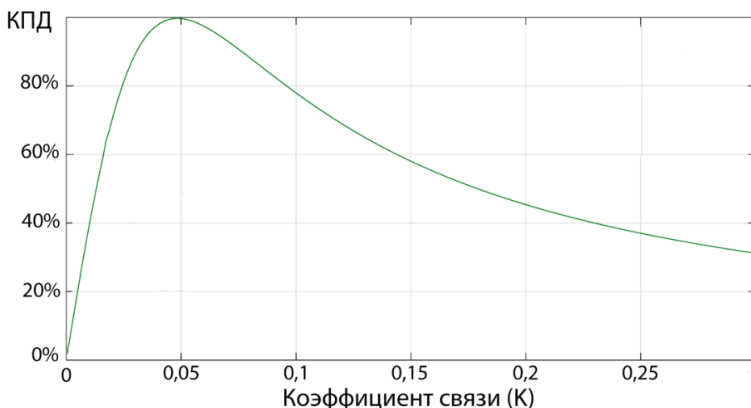


Рис. 6. Зависимость КПД предложенной системы от коэффициента связи



Все это даст нам нужный коэффициент связи, но чтобы оставить его в этом диапазоне, мы должны исключить другие факторы – а именно – смещения по координатам  $X$  и  $Y$  передающей и принимающей катушек.

#### *Особенности данной системы*

Для того чтобы достигнуть большой передачи энергии, нужно иметь большую добротность индуктивных ветвей. Однако это требует применения катушек с высокой индуктивностью, что приводит к увеличению размеров и веса системы. В этом методе используются конденсаторы большей емкости по отношению к традиционной модели. И, как следствие, чтобы установить частоту колебаний, нужны катушки индуктивности меньших размеров, поэтому их размер и вес становится меньше [5]. А дополнительные индукторы используются для того, чтобы повысить добротность цепи. В итоге получается уменьшение размеров и веса примерно на 80 %, при этом теряя лишь 5 % эффективности передачи энергии. А уменьшение веса дает возможность установки большего числа приемников энергии на дроне, что увеличит скорость зарядки. Отличие конструктивных параметров традиционной и новой систем представлены в таблице [2].

#### **Сравнение конструктивных параметров принимающих и передающих катушек в традиционной и новой системах**

Параметры	Передающая $L$ в традиционной системе	Передающая $L$ в новой системе	Принимающая $L$ в традиционной системе	Принимающая $L$ в новой системе
Длина, мм	15	3	20	4
Масса, г	7,37	1,58	8,63	1,78
Витков	41	8	48	9

#### **Зарядочная платформа с подвижным зарядочным модулем**

Платформа может быть оснащена одним большим витком, который бы охватывал всю платформу или хотя бы ее половину. Но эффективность передачи энергии значительно упадет из-за больших потерь передающего контура. Гораздо более эффективно использовать группу маленьких катушек, эквивалентных принимающим катушкам в дроне. Для обеспечения высокой эффективности зарядки требуется, чтобы смещение между приемной и передающей катушкой было минимальным. Но, несмотря на точность системы посадки БПЛА, будет присутствовать некоторое отклонение от центра платформы.

Для коаксиального расположения принимающих катушек дрона и передающих элементов платформы разработана зарядочная платформа с подвижным модулем зарядки. Она представляет собой 3-уровневую сис-

тему: 1 (включает *a, б*) – сама платформа посадки с маркером посередине и со встроенными солнечными батареями вокруг посадочной области для обеспечения автономности работы системы, т. к. она будет располагаться большей частью на крышах домов или в отдаленных местностях (полях, пустошах и т. д.), т. е. там, где всегда есть солнечный свет; 2 (включает *в, г, д*) – подвижный зарядочный модуль, который подстраивается под точное местоположение дрона на платформе. Сам модуль состоит из двух взаимоперпендикулярных рельсов *X* и *Y* и крутящейся сцены, на которой располагаются передающие катушки; 3 (включает *е*) – чувствительная панель, расположенная под всей зоной посадочной платформы. Изображение макета платформы представлено на рис. 7.

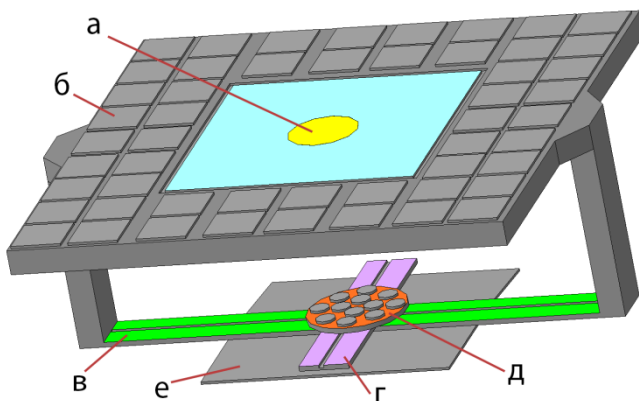


Рис. 7. Внешний вид зарядочной платформы: *a* – платформа посадки с маркером посередине, *б* – набор солнечных батарей, *в* – рельс оси *X*, *г* – рельс оси *Y*, *д* – сцена с передающими катушками, *е* – чувствительная панель

### Принцип действия

На посадочном шасси БПЛА расположены 4 небольших лазера – по одному на каждой ножке. При посадке на платформу они включаются. Так как посадочная платформа тонкая и прозрачная, лазер легко проходит через нее, но если он сядет несколькими ножками на околочарядную часть платформы, т. е. на панель солнечных батарей, эта часть площадки гораздо толще и не будет пропускать лазер. Под зарядочной платформой расположен чувствительный к лазеру сенсор, который принимает луч от лазера и запоминает его местоположение. Если на сенсор поступило менее 4 сигналов, значит, дрон сел некорректно и система дает команду о повторном его взлете и вторичной посадке. Если же все 4 сигнала поступают на сенсор, компьютер начинает устанавливать

подвижный модуль так, чтобы он был расположен точно под БПЛА. Это происходит следующим образом: зная 4 точки, программа определяет его центр, для того чтобы подвижная платформа смогла занять это местоположение, двигаясь по осям  $X$  и  $Y$ . Затем он ищет угол, на который нужно повернуть сцену для соответствия этим четырем точкам, а следовательно, и катушкам. Так как в примере рассматривается симметричная сцена, а шасси дрона образует квадрат, то достаточно сопоставить ближайшие точки на сцене и точку, определенную сенсором.

Программа связана с контроллерами, которые двигают платформу по рельсам по осям  $X$  и  $Y$  и поворачивают ее сцену на требуемый угол. После того как система заняла нужное местоположение, включается непосредственно сама беспроводная зарядка дрона.

### **Вывод**

Как уже было сказано, главная слабость дронов – их батарея. Ее емкость трудно увеличить, так как это существенно увеличит вес БПЛА. Поэтому единственный метод борьбы с небольшой продолжительностью полетов – создание автоматизированных беспроводных зарядочных станций для быстрой и автономной перезарядки летательных средств. Эта система является полным комплексным устройством зарядки БПЛА, которая учитывает и решает главные трудности всех подобных систем. А именно: точное приземление на зарядочную платформу, эффективность передачи энергии беспроводным путем, вес вовлеченных устройств и автономность работы всей системы. Приземление осуществляется камерой и специальной программой, контролирующей траекторию движения, которые практически не добавляют веса дрону и работают достаточно точно. Усовершенствованная система индуктивной зарядки дает значительный выигрыш в весе и габаритах, а следовательно, и в эффективности самой передачи энергии. Платформа же взаимодействует с системой приземления дрона, что делает посадку еще более точной и безопасной и является генератором энергии, используя солнечные батареи. Все это упрощает и автоматизирует процесс работы БПЛА и делает возможными длительные миссии дронов без какого-либо человеческого вмешательства. Помимо этого, вся система практически не ощутима дроном, т. е. она почти никак не будет влиять на летные характеристики БПЛА, т. к. все используемые приборы или уже были внедрены в дрон, или же являются маловесными и практически не выступают за габариты.

Дальнейшая работа будет направлена на усовершенствование посадочного процесса. Также будет проделана работа по доработке, усовершенствованию и дальнейшему тестированию новой индуктивной зарядки.

### Список литературы

1. Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles / A. B. Junaid, A. Konoiko, Ya. Zweiri, M. N. Sahinkaya, L. Seneviratne // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 8–9.
2. A new technique for reducing size of a WPT system using two-loop strongly-resonant inductors / M. Rozman, M. Fernando, B. Adebisi, K. M. Rabie, T. Collins, R. Kharel, A. Ikpehai // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, no. 10. – Pp. 7–15.
3. Fast autonomous landing on a moving target at MBZIRC / M. Beul, S. Houben, M. Nieuwenhuisen, S. Behnke // *European Conference on Mobile Robotics (ECMR)*. Paris, France, September 2017. – Pp. 2–4.
4. Autonomous inductive charging system for battery-operated electric drones / M. Khonji, Ch.-M. Tseng, M. Alshehhi, Ch.-K. Chau // *Conference: the Eighth International Conference, May 2017, e-Energy'17*. – Pp. 2–3.
5. *Campi, T.* Wireless power transfer technology applied to an autonomous electric UAV with a small secondary coil / T. Campi, S. Cruciani, M. Feliziani // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, no. 2. – Pp. 3–5.
6. *Lippiello, V.* Visual coordinated landing of a UAV on a mobile robot manipulator / V. Lippiello, R. Mebarki, F. Ruggiero // *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, Linköping, Sweden, 21–26 Oct. 2013. – Pp. 5–6.
7. *Griffin, B.* Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV / B. Griffin, C. Detweiler // *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. – Pp. 4–5.
8. *Lee, D.* Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing / D. Lee, T. Ryan, H. J Kim // *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Saint Paul, USA, 14–18 May 2012. – Pp. 8–9.

A. A. Mironov, student

E-mail: Nomanyash@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Complex of Systems for Highly Efficient Autonomous Charging of Unmanned Aerial Vehicles

*The UAV has a significant disadvantage – the duration of battery life. It crucially limits the possibility of their performance. The article is devoted to the creation of a complex of systems that are going to solve this problem. There will be reviewed the system of autonomous take-off / landing, highly efficient wireless charging and charging platform.*

**Keywords:** wireless charging, unmanned aerial vehicles, UAV, automated battery charging platform, autonomous working, drone.

---

УДК 621.317.3

Ю. Г. Подкин, д-р техн. наук, проф.

E-mail: podkin2010@mail.ru

Сарапульский политехнический институт (филиал) Ижевского государственного  
технического университета имени М. Т. Калашникова

Т. Г. Чикуров, канд. техн. наук, ведущий инженер

E-mail: titech2@mail.ru

ОАО «Элеконд», г. Сарапул

## **Исследование влияния предельных воздействий на эксплуатационные характеристики суперконденсаторов**

*Приведены результаты исследований воздействия перенапряжения и предельных токов зарядки на основные характеристики суперконденсаторов. Описано влияние перенапряжения на саморазряд суперконденсатора. На основе анализа динамики переходных процессов определены предельные напряжения и напряжение разрушения суперконденсаторов.*

**Ключевые слова:** двойной электрический слой, суперконденсатор, накопитель, саморазряд, ток утечки, перенапряжение.

### **Введение**

Потребности современной техники в малогабаритных, энергоемких, автономных источниках питания вызвали интенсивное развитие элементной базы на основе двойного электрического слоя (ДЭС). Применение нанотехнологий формирования ДЭС позволило существенно повысить отношение площади поверхности к объему конструктивных элементов и, таким образом, достигать значений удельных емкостей до  $10^0-10^3$  Ф/см<sup>3</sup> [1]. Такие элементы классифицируют как суперконденсаторы (СК). Применение в электронной технике нашли как единичные СК (ЕСК), так и накопители электрической энергии (НЭЭ) на основе объединения ЕСК. Например, в сочетании с химическими или тепловыми источниками НЭЭ за секунды заряжаются предельными токами для последующего длительного электропитания бортовой сети. Однако при уменьшении толщин диэлектрических прослоек существенно возросли напряженности микроэлектрических полей, воздействующих на них, что отразилось в ограничении рабочих напряжений [2] и токов СК. Поэтому при конструировании изделий на основе ДЭС необходимо четко представлять предельные допустимые воздействия на ЕСК, гарантирующие безопасную продолжительную работу таких элементов.

### Исследование влияния перегрузок по напряжению на эксплуатационные характеристики единичных суперконденсаторов

Структура СК за счет применения нанопористого углерода обладает сильно развитой поверхностью вблизи каждого электрода. Для увеличения емкости СК размеры нанопор электродов должны быть такими, чтобы обеспечить проникновение в них ионов электролита всех имеющихся размеров [1–3]. При подключении к ЕСК зарядного напряжения на каждом из электродов формируются ДЭС, образуемые избыточными носителями противоположной полярности. Емкости ДЭС электродов соединены через электролит последовательно, и общая емкость СК  $C$  не превышает половины величины меньшей из емкостей слоев. Эквивалентную схему такой структуры можно представить в виде смешанного  $rRC$  – двухполосника (рис. 2), продольное сопротивление которого  $r_i = \rho l_i / S_i$  определяется парциальными параметрами: удельным сопротивлением материала электрода  $\rho$ , длиной  $l_i$  и эффективным сечением  $S_i$ ; нанопоры, емкость  $C_i = \epsilon_0 \epsilon S_i / d_i$  – параметрами двойного слоя [1–4], шунтирующее их сопротивление  $R$  – сквозной проводимостью приэлектродных слоев электролита. Эквивалентные параметры ЕСК определяются параллельным соединением парциальных двухполосников и вызывающего саморазряд емкости электрода шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$ , моделирующего все виды конструктивных потерь (рис. 1).

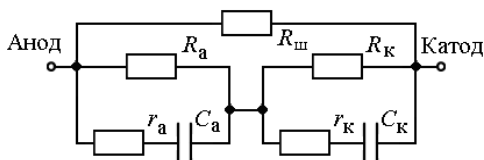


Рис. 1. Эквивалентная схема единичного суперконденсатора

Из эквивалентной схемы (рис. 1) следует, что возможности применения ЕСК в создании НЭЭ и особенности их эксплуатации в первую очередь определяются параметрами-критериями: электрической емкостью  $C$ , эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС)  $r$ , током утечки  $I_{ут}$  и напряжением саморазряда  $U_{ср}$ .

Обычно ЕСК и НЭЭ используются в номинальном режиме, для которого и устанавливаются эти параметры. Однако в процессе эксплуатации кратковременно или длительно электронные компоненты могут подвергнуться воздействиям, превышающим номинальные. Поэтому важно оценить запас прочности, которым обладают СК, чтобы при про-

ектировании технических средств с их использованием обеспечить высокую, но не чрезмерную надежность.

Для определения устойчивости к перегрузкам оценим в первую очередь реакцию СК на влияние перенапряжений и повышенных токов. Критическими будем считать такие воздействия, при которых в результате перегрузки емкость  $C$  изменится на 30 % или ЭПС  $r$  на 100 %. Превышение этих отклонений будем рассматривать как предельный режим. Эксперимент проводим с использованием СК торговой марки *NESSCAP*, по пять штук каждого номинала. Структурная схема экспериментально-измерительной установки представлена на рис. 2. Для получения диаграмм вольтметр заменяется на осциллограф или регистрирующую осциллографическую приставку. Источник питания 2 с последовательным сопротивлением используется для линейаризации разрядной кривой на участке измерения емкости. В качестве переключателя SA1 использовалось реле программируемое типа ОВЕН ПР 114-224.8Д4А.

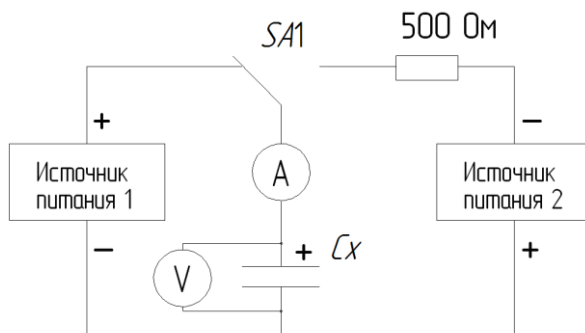


Рис. 2. Схема экспериментально-измерительной установки

На рис. 3, а представлены результаты измерений относительного изменения текущего значения емкости ЕСК  $\Delta C_i = (C_i - C_{\text{ном}})/C_{\text{ном}}$ , %, где  $C_i$  – текущее значение емкости при перенапряжении,  $C_{\text{ном}}$  – номинальная емкость при номинальном зарядном напряжении  $U_{\text{ном}} = 2,7$  В. На рис. 3, б изображено относительное изменение остаточной емкости ЕСК  $\Delta C_{\text{ост}} = (C_{\text{ост}} - C_{\text{ном}})/C_{\text{ном}}$ , %, где  $C_{\text{ост}}$  – остаточная емкость, измеренная с пятиминутной выдержкой после снятия перенапряжения. При возрастании перенапряжения на ЕСК до 4 В текущая емкость в проведенной серии имела тенденцию к возрастанию примерно на 3,5 %, что отражает продолжение процесса формирования ДЭС. Но остаточная емкость при этом несколько снижалась, ориентировочно на 1 %. Таким образом,

увеличение зарядного напряжения до 4 В не приводит к катастрофическим изменениям, хотя при снятии избыточного напряжения полного восстановления номинальной емкости не происходит.

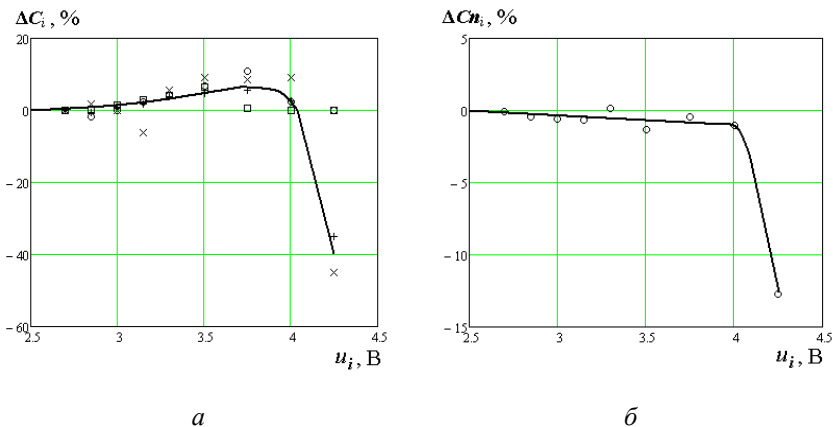


Рис. 3. Влияние перенапряжения: на текущее значение емкости (а); на остаточную емкость после снятия перенапряжения (б): символы  $\times$ ,  $+$ ,  $\square$ ,  $\circ$  относятся, соответственно, к параметрам ЕСК 2,5В×6Ф, 2,5В×10Ф и нормированным на ЕСК параметрам НЭЭ: 10В×1,5Ф (на основе 4×2,5В×6Ф) и НЭЭ 20В×1,25Ф (на основе 8×2,5В×10Ф)

На рис. 4 показано относительное изменение ЭПС<sub>АС</sub>  $\Delta R_i$  при воздействии перенапряжения. Для всех испытанных образцов СК перенапряжение сопровождалось возрастанием ЭПС. Причем уже при напряжении 4 В относительное увеличение сопротивления некоторых образцов превышало критическое. В целом это позволяет судить об отсутствии разрушения структуры и допустимости эпизодического воздействия такой перегрузки.

Дальнейшее возрастание зарядного напряжения приводило к снижению емкости примерно на 40 %, рис. 3, а. При этом ЭПС некоторых СК возрастало, хотя наблюдался и спад сопротивления. Кроме того, удержание напряжения  $U_{зар} = 4,25$  В требовало от источника повышенных токов в силу возрастания токов утечки и активизации процессов саморазряда в СК, которые приводили к нагреву и снижению емкости. Последующее повышение зарядного напряжения сопровождается еще более резким увеличением зарядных токов, ведет к перегреву и выходу из строя СК. Это свидетельствует об активизации деградационных процес-



сов. В интервале перенапряжений 4–4,25 В снижение номинальной емкости становится катастрофическим.

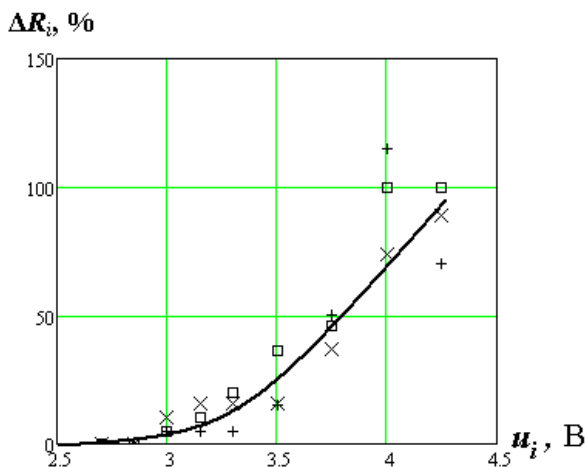


Рис. 4. Влияние перенапряжения на текущее значение эквивалентного последовательного сопротивления. Условные обозначения соответствуют рис. 3

### Влияние перенапряжения на процессы саморазряда

На рис. 5 приведены результаты измерения напряжения саморазряда ЕСК 2,5×6Ф после воздействия перенапряжения. Для выявления остаточных изменений после проведения испытания на воздействие перенапряжений конденсаторы разряжались и после пятиминутной выдержки заряжались повторно до номинального напряжения 2,7 В, после чего в процессе саморазряда измерялось остаточное напряжение.

На рис. 5, а приведено семейство характеристик саморазряда в относительном масштабе. За основу принято номинальное напряжение на ЕСК 2,7 В. Воздействующие напряжения обозначены: 1 – 2,7 В; 2 – 3,0 В; 3 – 3,5 В; 4 – 4,0 В; 5 – 4,25 В. Расчетные характеристики тока саморазряда, приведенные на рис. 5, б, обозначены: 1 – заряд до номинального напряжения; 2 – перенапряжение 4 В; 3 – перенапряжение 4,25 В. Анализ экспериментальных данных показал, что описать процесс саморазряда реального СК с использованием модели с одной постоянной времени  $\tau$  невозможно.

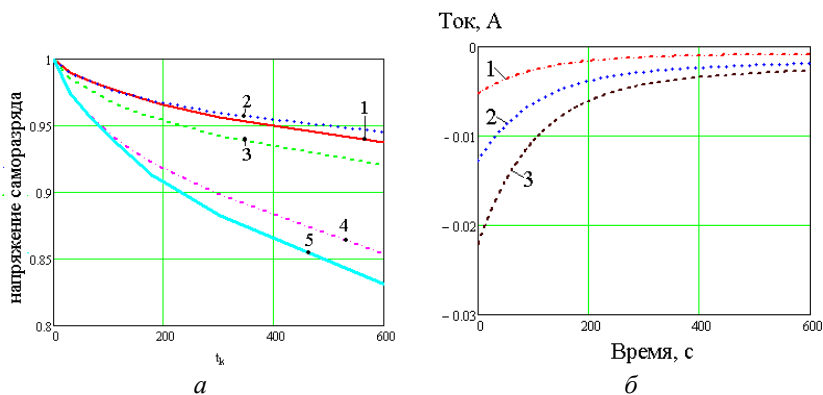


Рис. 5. Влияние перенапряжения на процесс саморазряда: переходные характеристики по напряжению (а) и току (б)

Для повышения точности моделирования приходится от эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами, перейти к представлению об ионно-молекулярных комплексах, распределенных в межэлектродном пространстве СК [5]. Такую среду следует описывать на основе гипотезы о распределении постоянных времени  $\tau_i$ . Тогда уравнение переходной характеристики можно представить рядом

$$u(t) = \sum_{i=1}^n U_{0i} \cdot \exp(-t / \tau_i), \quad (1)$$

где  $U_{0i} = U_0 k_i$  – начальное напряжение подсистемы структурных элементов с постоянной времени  $\tau_i$ ;  $k_i$  – весовые коэффициенты, причем выполняются условия нормировки  $\sum k_i = 1$ ,  $\sum U_{0i} = U_{\text{ном}}$ .

Для аппроксимации экспериментальных данных 1 (рис. 4) достаточно четырех постоянных времени, распределенных по закону  $\tau_i = 1 \cdot 10^{6-i}$ ,  $i = 1 \dots n$ ,  $n = 4$  (рис. 6). Весовые коэффициенты имеют значения:  $k_1 = 0,8$ ;  $k_2 = 0,12$ ;  $k_3 = 0,055$ ;  $k_4 = 0,025$ . Начальные напряжения подсистем структурных элементов  $U_{01} = 2,16$ ;  $U_{02} = 0,324$ ;  $U_{03} = 0,149$ ;  $U_{04} = 0,068$ . Подстановка этих значений в формулу дает переходную характеристику 2, удовлетворительно аппроксимирующую экспериментальные значения  $I$  во всем временном диапазоне. Ток саморазряда определяется производной от напряжения:

$$i(t) = C \frac{d}{dt} u(t). \quad (2)$$

Соответствующая характеристика – кривая 1 на рис. 5, б. Максимальное значение тока  $i(0) = -5,265$  мА.

Как и в номинальном режиме заряда при воздействии перенапряжений переходные характеристики саморазряда достаточно точно аппроксимируются только при использовании представления о распределении постоянных времени в соответствии с приведенным уравнением.

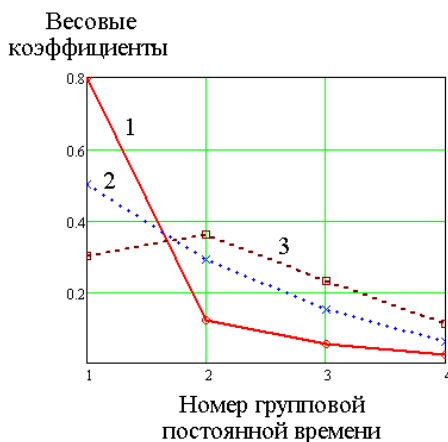


Рис. 6. Распределение групповых постоянных времени

Из рис. 5, а и 5, б следует, что скорость саморазряда и начальный ток саморазряда при увеличении воздействующего напряжения нарастают. Рис. 6 позволяет объяснить эти деградационные процессы перераспределением постоянных времени из-за структурных изменений в СК. Если в номинальном режиме доминирует основная структура, характеризующаяся постоянной времени  $\tau_1 = 10^5$  с, а совокупное влияние мелкоструктурных элементов не превышает 20 %, то под воздействием перенапряжения внутренняя структура нарушается. При перенапряжении 4 В наступает паритет между вкладами основной структуры и мелкоструктурных элементов, а при перенапряжении 4,25 В (кривая 3) вклады деструктурированных элементов начинают доминировать. Можно предположить, что разрушение структуры сопровождается образованием проводящих перемычек в нанопорах, что отражается уменьшением емкости (рис. 2), возрастанием парциальных сопротивлений (рис. 4) и разрядного тока (кривые 2, 3 на рис. 5, б).

Таким образом, можно полагать, что для СК с номинальным напряжением 2,5 В возможно кратковременное увеличение напряжения до 4 В, т. е. на 60 %. Но при этом возникают необратимые изменения характеристик и параметров.

### Исследование влияния токовых перегрузок на эксплуатационные характеристики единичных суперконденсаторов

Скорость заряда СК зависит от величины зарядного тока, поэтому важно проанализировать динамику переходных процессов в различных токовых режимах. Для исследования скоростных характеристик заряда использовалась измерительная установка в составе каскадно включенных: источника питания ИПС 2000-220/24В-70А; нагрузки; осциллографа цифрового с режимом записи типа Agilent 54621А. Для калибровки измерительной установки в качестве нагрузки включался образцовый резистор сопротивлением  $0,1 \text{ Ом} \pm 0,5 \%$ ,  $0,5 \text{ кВт}$ , в режиме измерений – СК NESSCAP  $2,5 \times 10\text{Ф}$ . Относительные погрешности измерения времени и амплитуды напряжения определяются характеристиками осциллографа и составляют не более 2,5 %. Осциллограммы переходного процесса по току приведены на рис. 7.

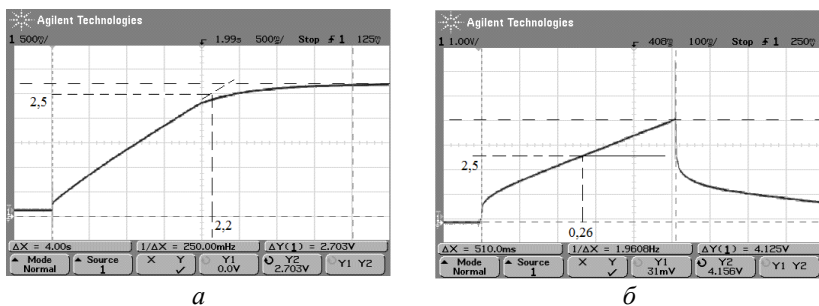


Рис. 7. Осциллограммы переходного процесса при зарядном токе:  
 $I = 5 \text{ А}$  (а);  $I = 30 \text{ А}$  (б)

На рис. 8 изображена зависимость продолжительности переходного процесса (кривая 1) и предельного напряжения (кривая 2) от зарядного тока  $I$ . В диапазоне зарядных токов 0–15 А переходная характеристика соответствовала осциллограмме рис. 6, а, при токах более 20 А – рис. 6, б. При токах  $11 < I < 15$  ампер СК нагревался до 30–40 °С (область 3 на рис. 8), при токах  $15 < I < 60$  А температура возрастала до 40–50 °С (область 4 на рис. 8). Относительное изменение емкости и сопротивления во всем диапазоне воздействующих токов не превышало 5 % и 10 %, соответственно.

соответственно. Момент завершения процесса заряда определялся точкой пересечения касательной к фронту переходной характеристики с уровнем  $U_{ном} = 2,5$  В (рис. 7).

Из рис. 8 видно, что при токах  $I > 15$  А возрастание тока сопровождалось немонотонным возрастанием предельного напряжения до 5,1 В с локальным максимумом 4,8 В при токе 25 А.

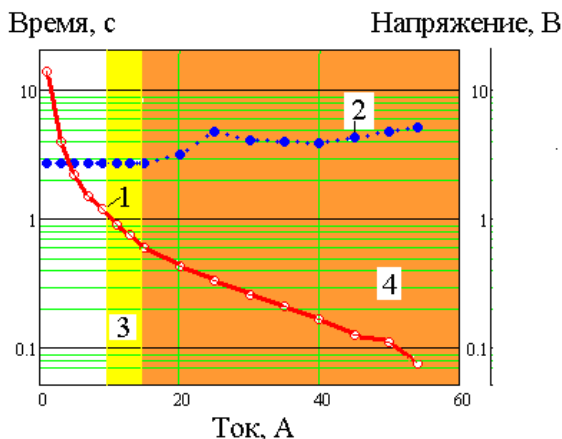


Рис. 8. Скоростная (1) и перегрузочная по напряжению (2) характеристики; 3 – нагрев до 30–40 °С, 4 – нагрев до 40–50 °С

Таким образом, можно полагать, что допустимо заряжать СК емкостью 6–10 Ф токами до 50 А без ухудшения их параметров. Сопровождающие процесс кратковременные перегрузки по напряжению и перегреву обратимы. Это позволяет многократно использовать скоростные режимы заряда СК. Например, для обеспечения зарядки ЕСК емкостью 10 Ф до номинального напряжения 2,5 В за одну секунду требуется постоянный ток зарядки не менее 10 А.

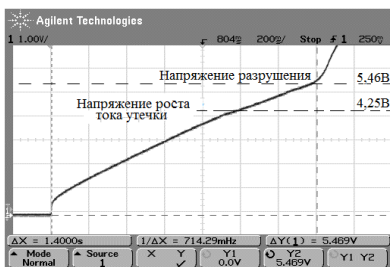
### Определение предельных перенапряжений и напряжений разрушения

Испытания проводились путем воздействия на ЕСК фирмы NESSCAP номиналами 2,5 В×6 Ф и 2,5 В×10 Ф зарядными токами 20 и 40 А. Осциллограммы напряжений на ЕСК при воздействии указанных токов приведены на рис. 9.

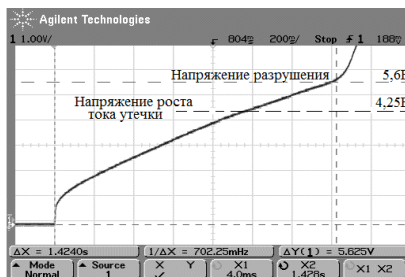
Из рис. 9, а и 9, б видно, что в момент включения воздействующего тока напряжение на исследуемых конденсаторах скачком возрастало

примерно до 0,5 В при токе 20 А и 0,8 В при токе 40 А. Это связано с падением напряжения на ЭПС. В течение 1,4 с для ЕСК на рис. 9, а и 1,424 с для ЕСК на рис. 9, б напряжение монотонно возрастало до 5,46 и 5,6 В соответственно. При перенапряжении свыше 4,25 В скорость возрастания напряжения незначительно снижалась и начинался интенсивный разогрев конденсаторов. В результате примерно через 0,4 с происходит взрыв и воспламенение.

Это связано с тем, что перенапряжение вначале приводит к возрастанию токов утечки из-за быстрого нарастания количества микропробоев нанопор. Эти токи разогревают электролит СК, что, в свою очередь, ускоряет процессы генерации токов утечки. Из-за регенерации рост тока утечки принимает лавинообразный характер, что сопровождается резким уменьшением сопротивления шунта  $R_{ш}$  (рис. 8). В результате выделяемая на нем мощность  $P_{ш} = U^2/R_{ш}$  быстро нарастает (параболическая зависимость), что и вызывает разогрев, а затем и разрушение конденсатора. Из рис. 9 видно, что напряжения разрушения для обоих испытанных ЕСК сопоставимы ( $5,5 \pm 0,1$  В), что, на наш взгляд, подтверждает предложенную модель разрушения.



а



б

Рис. 9. Осциллограммы напряжений на ЕСК:

2,5 В×6 Ф при зарядном токе 20 А (а); 2,5 В×10 Ф при зарядном токе 40 А (б)

## Выводы

При проектировании устройств на основе элементов с ДЭС следует учитывать, что при их эксплуатации возможно кратковременное увеличение напряжения до 4 В, т. е. на 60 %. Но при этом возникают необратимые изменения характеристик и параметров. Допустимо экспрессно заряжать СК емкостью 6–10 Ф токами до 50 А без ухудшения их параметров. Сопровождающие процесс кратковременные перегрузки по напряжению и перегреву обратимы. Это позволяет многократно использовать скоростные режимы заряда СК.

Разрушение НЭЭ происходит при 70–80% перенапряжении. При этом скорость возрастания напряжения незначительно снижается относительно номинальной, начинается интенсивный разогрев конденсаторов, происходит взрыв и воспламенение. Следовательно, при проектировании устройств на основе ДЭС должна быть предусмотрена система поэлементного контроля напряжения на каждом ЕСК и управление на основе критериев допустимости предельного режима.

Деградиционные процессы, инициированные перенапряжениями, сопровождаются перераспределением постоянных времени из-за структурных изменений в СК. Если в номинальном режиме доминирует основная структура, характеризуемая постоянной времени  $\tau_1 = 10^5$  с, а совокупное влияние мелкоструктурных элементов не превышает 20 %, то под воздействием перенапряжения внутренняя структура нарушается. При 6–10% перенапряжении вклады деструктурированных элементов начинают доминировать. По-видимому, разрушение структуры сопровождается образованием проводящих перемычек в нанопорах, что отражается уменьшением емкости, возрастанием парциальных сопротивлений и разрядного тока. Предложенная методика исследования структурных изменений в ЕСК и НЭЭ может использоваться при синтезе новых типов суперконденсаторов.

### Список литературы

1. *Деньщиков, К. К.* Суперконденсаторы: принципы построения, техника и применения [Электронный ресурс] // ОИВТ РАН [Сайт]. – URL: [https://jiht.ru/science/science\\_council/presentations/denshchikov/Ученый совет 2013 финал.pdf](https://jiht.ru/science/science_council/presentations/denshchikov/Ученый_совет_2013_финал.pdf) (дата обращения: 15.06.2018).
2. *Ву, Дык Хоан.* Исследование и разработка тонкопленочных многослойных электролитических ячеек : дис. ... канд. техн. наук : 05.27.06. – М. : МАИ, 2017. – 144 с. – URL: <http://misis.ru/science/dissertations/2017/3354> (дата обращения: 27.06.2018).
3. *Bartley, T.* Ultracapacitors and batteries for energy storage in heavy-duty hybrid-electric vehicles // The 22nd International Battery Seminar & Exhibit (Broward County Convention Center, Fort Lauderdale, Florida, USA, March 14–17, 2005). – Pp. 1–12. – URL: [http://formulahybrid.ru/Books/new/technical\\_paper\\_ultracaps.pdf](http://formulahybrid.ru/Books/new/technical_paper_ultracaps.pdf) (дата обращения: 27.06.2018).
4. *Подкин, Ю. Г.* Электротехника и электроника / Ю. Г. Подкин, Т. Г. Чикуров, Ю. В. Данилов. – Т. 2. – Электроника / под ред. Ю. Г. Подкина. – М. : Академия, 2011. – 400 с.
5. *Podkin, Yu. G.* Dielectric measurements of aqueous solutions of electrolytes / Yu. G. Podkin, O. M. Rozental // Measurement Techniques, 2014. – Vol. 56, no. 12. – Pp. 1439–1447.

*Yu. G. Podkin*, DSc in engineering, professor

E-mail: podkin2010@mail.ru

Sarapul Polytechnic Institute (branch) of Kalashnikov Izhevsk State Technical  
University, Sarapul, Russian Federation

*T. G. Chikurov*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: tigech2@mail.ru

Elecond OJSC, Sarapul, Russian Federation

## **Study of the Influence of Limit Effects on the Performance of Supercapacitors**

*The results of studies of the impact of overvoltage and charging current limits on the basic characteristics of supercapacitors are presented. The effect of overvoltage on the self-discharge of the supercapacitor is described. Based on the analysis of the dynamics of transients, the limiting stresses and fracture stresses of supercapacitors are determined.*

**Keywords:** double electric layer, supercapacitor, storage, self-discharge, leakage current, overvoltage.



---

УДК 004.422.83

*В. О. Шамсияхметова*, студент

Техникум радиоэлектроники и информационных технологий  
имени А. В. Воскресенского, г. Ижевск

*О. Я. Шамсияхметов*, ст. преподаватель

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

зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

E-mail: GL@idz.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Разработка учебного лабораторного макета на базе программно-аппаратных комплексов LabView и Arduino**

*Необходимость создания учебных лабораторных макетов сталкивается с проблемами комплектации измерительными модулями с высокими техническими характеристиками и приемлемой ценой. При этом сопутствующее программное обеспечение обычно рассчитано на оборудование фирмы изготовителя. Все это приводит к необоснованному удорожанию программно-аппаратных комплексов. Был предложен бюджетный вариант измерительной станции для определения температуры окружающей среды. При этом появилась возможность самостоятельно конфигурировать виртуальный измерительный прибор под поставленные прикладные задачи.*

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, LabView, Arduino, блок-схема, инсталляция макета, визуальный язык программирования.

### **Введение**

Среда разработки LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) представляет собой прекрасное средство цифровой обработки сигналов. Для упрощения составления программ применяется полностью графическая среда программирования, т. е. применять знания в области программного языка высокого уровня не требуется, а лишь необходимо иметь представление о протекающих в схемах электрических сигналах. Преимуществом программного продукта компании National Instruments (США) является наличие многоканальных, малошумящих АЦП И ЦАП, производимых данной фирмой для LabView, которые взаимодействуют с этой средой и позволяют создавать готовые приборы и системы на их основе. Данные устройства работают с различными интерфейсами и протоколами обмена данных. Например, для учебных целей National Instruments выпускает настольную платформу

NI ELVIS (Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite – учебная лабораторная станция виртуальных приборов) для подключения к персональному компьютеру. NI ELVIS имеет следующие характеристики:

- 16 каналов АЦП при включении с общей землей (8 дифференциальных);
- разрешение 16 бит;
- максимальная частота дискретизации АЦП 1,25 МГц при измерении в одноканальном режиме;
- 24 цифровых канала;
- динамический диапазон напряжений от  $-10$  В до  $+10$  В;
- регулируемые источники питания от  $-12$  В до  $+12$  В.

Однако несомненным минусом данных устройств National Instruments является высокая цена. Поэтому целесообразно подобрать для простейших экспериментов и учебных целей менее дорогостоящие устройства.

### **Разработка макета на основе платформы Arduino**

В качестве доступной альтернативной платформы рассмотрим программно-аппаратный комплекс Arduino, который представляет open-source платформу на основе программируемого микроконтроллера Atmega 328p. Данный микроконтроллер может быть программно сконфигурирован для использования в качестве аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Проекты на Arduino являются автономными после произведенной инсталляции, т. е. они работают в дальнейшем независимо от управляющего компьютера. Комплекс Arduino может принимать и получать информацию от программного обеспечения, установленного на персональном компьютере.

Arduino можно собрать самостоятельно из отдельных радиоэлементов либо приобрести готовые устройства оригинального (итальянского) или неоригинального (китайского) производства.

Платформа имеет следующие характеристики:

- 14 цифровых входов/выходов;
- 6 аналоговых входов;
- разрешение: 10 бит;
- максимальная частота дискретизации АЦП: 10 кГц при измерении в одноканальном режиме;
- кварцевый генератор: 16 МГц;
- объем ОЗУ: 2 кБ;
- объем флеш-памяти: 32 кБ;
- напряжение питания:  $+5$  В,  $+3,3$  В;
- постоянный ток: 40 мА.

Разрешающая способность или точность АЦП определяется возможностями контроллера Atmega 328p. Здесь используется 10-разрядный АЦП, поэтому точность АЦП с идеальной передаточной характеристикой определяется:

$$\Delta = 100 \% \cdot 2^{-10} = 0,098 \%. \quad (1)$$

Полная ошибка обычно не превышает 2 единиц младших разрядов (по информации от производителей):

$$\Delta_{\Sigma} = 0,098\% \cdot 2 = 0,195 \%. \quad (2)$$

То есть при измерении комнатной температуры (20 °С) погрешность квантования по температуре составит 0,06 °С.

Среда программирования Arduino IDE распространяется бесплатно и доступна для скачивания с официального сайта. Язык визуального программирования LabView доступен для скачивания с сайта National Instruments (NI) и имеет период бесплатного использования 30 дней.

Также необходимо установить стандартизированный интерфейс ввода-вывода в области измерений для управления приборами с персонального компьютера NI VISA (National Instruments Virtual Instrument Software Architecture). Данный интерфейс представляет библиотеку функций для языка С, которая унифицирует доступ ко всем измерительным устройствам. Интерфейс VISA предполагает общение с прибором в форме «запрос-ответ». Данная библиотека может быть скачана бесплатно с сайта NI.

В качестве датчика используется прецизионный температурный датчик LM35 с широким диапазоном температур (от –55 до +150 °С), высокой точностью измерения (0,75 °С), калиброванным выходом по напряжению компании National Semiconductor.

Блок-схема подключения лабораторного макета представлена на рис. 1.

Отладка макета начинается с настройки программно-аппаратного комплекса Arduino. Согласно рис. 1 проверяем работу блоков А1 и А2. Для этого запускается среда разработки Arduino IDE на персональном компьютере и загружается скетч (программа на языке С).

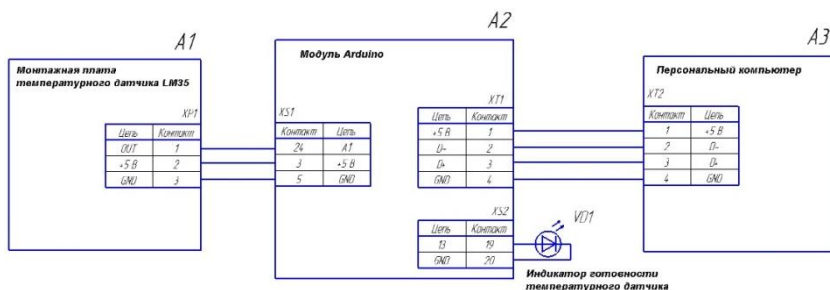


Рис. 1. Блок-схема подключения элементов лабораторного макета

Последовательность сборки и активизации лабораторного макета:

1. К плате Arduino UNO R3 присоединить монтажную плату с установленным на ней температурным датчиком LM35 с помощью электрических проводов согласно рис. 1:

- 1.1. Левый вывод датчика подключить к +5 В.
- 1.2. Центральный вывод подключить к общему проводу.
- 1.3. Правый вывод датчика подключить к аналоговому выходу А1 модуля Arduino UNO R3.

2. Установить светодиод индикатора готовности (желтого свечения) на модуле Arduino UNO R3 к выводам 13 (анод светодиода) и GND (катод светодиода).

3. Подключить модуль Arduino UNO R3 кабелем USB к персональному компьютеру.

4. Запустить программу Arduino IDE.

5. Загрузить скетч (программа на языке C) в модуль Arduino UNO R3.

6. Открыть в Arduino IDE монитор последовательного канала для просмотра информации от температурного датчика.

На мониторе отображается температура с датчика каждые две секунды в градусах Цельсия с точностью до сотых долей. Информация выводится в данном случае через порт ввода-вывода COM5 (зависит от подключения USB-кабеля и устанавливается в настройках Arduino IDE). Работа модуля Arduino представлена на рис. 2 (в порядке эксперимента на измерительный элемент оказывается кратковременное температурное воздействие (охлаждение и нагревание)).

Данный измерительный комплекс позволяет лишь фиксировать температуру через заданные промежутки времени. Однако часто в научных и исследовательских работах требуется управлять данным потоком информации. Например, следующим образом:

1. Выделить информационные потоки во времени.
2. Отсечь лишнюю информацию (селективный отбор).
3. Определить тенденции (обобщенные направления изменения параметров) во времени.

Эти возможности позволят реализовать комбинированный измерительный комплекс на базе Arduino и LabView.

Внешний вид лабораторного макета представлен на рис. 3.

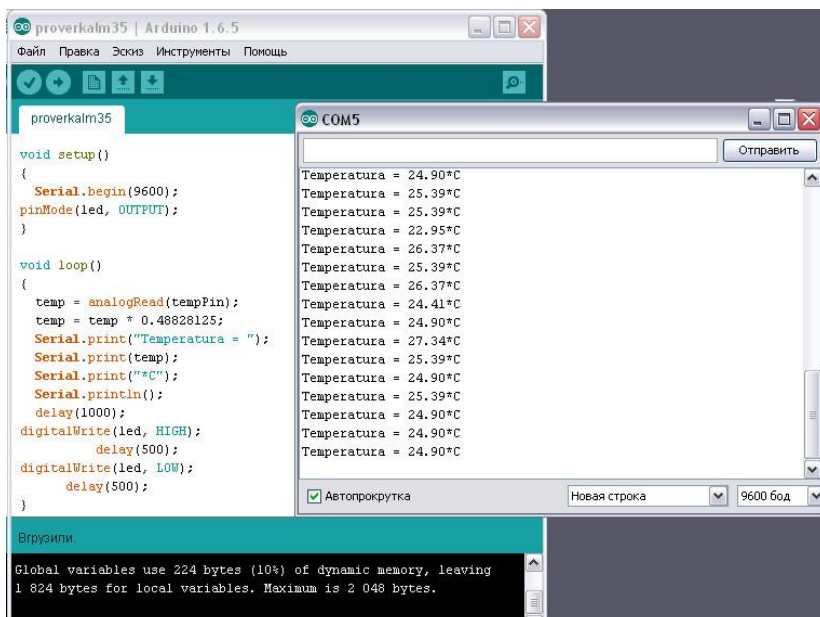


Рис. 2. Измерение температуры в помещении с помощью модуля Arduino с использованием монитора последовательного порта для вывода измеренной температурной информации

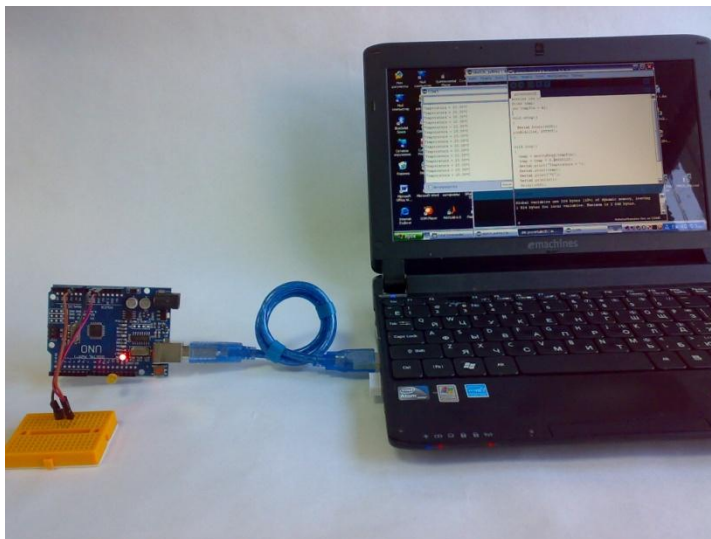


Рис. 3. Внешний вид измерительного лабораторного макета с использованием модуля Arduino

Для реализации данного лабораторного макета возможна доработка предыдущего макета с установкой программы LabView и интерфейса ввода-вывода в области измерений NI VISA.

### **Программная доработка макета с помощью LabVIEW**

Последовательность инсталляции лабораторного макета:

1. Запустить программу Arduino IDE.
2. Загрузить скетч (программа на языке C) в модуль Arduino UNO.
3. Запустить программу LabView.
4. Создать блок-схему виртуального прибора на языке визуального программирования LabView. Блок-схема состоит из двух диаграмм, связанных между собой логическими соотношениями.
5. Создать фронтальную панель виртуального прибора, на которой разместить различные графические и текстовые индикаторы информации.
6. Запустить виртуальный прибор.

Блок-схема представлена на рис. 4 и 5.

На первой блок-схеме рис. 4 представлен цикл условия while loop, установленный по следующему пути: Programming > Structures > While Loop. Внутри цикла созданы две логические структуры Case (Programming > Structures > Case Structure).

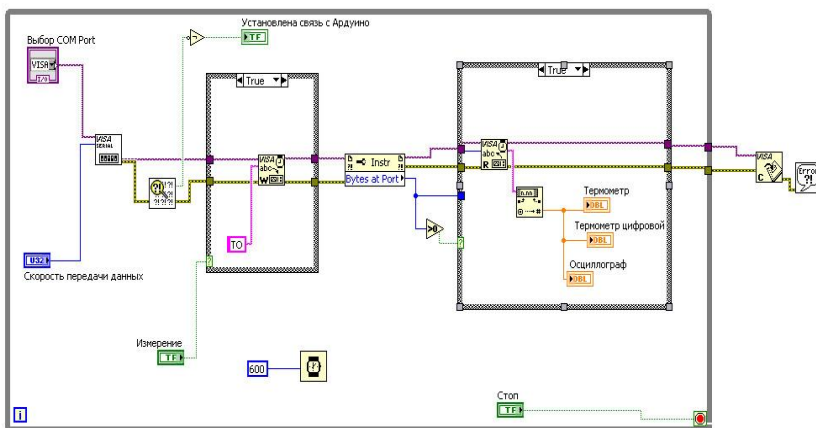


Рис. 4. Диаграмма № 1 виртуального измерительного прибора на базе LabView с использованием модуля Arduino

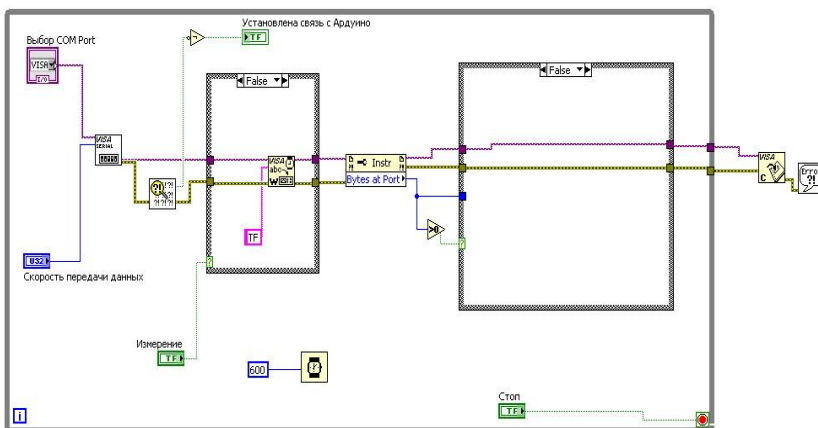


Рис. 5. Диаграмма № 2 виртуального измерительного прибора на базе LabView с использованием модуля Arduino

Первая структура используется для записи строки информации, вторая – для чтения данных измерений. Для управления приборами с персонального компьютера применяется стандартизированный интерфейс ввода-вывода в области измерений NI VISA (Instrument > Serial > VISA Configure Serial Port) согласно рис. 4. Для включения и выключения датчика температуры на панели виртуального прибора установлены

кнопки управления (Buttons > OK Button). Для согласования работы Arduino и LabView используется таймер задержки на 600 мс (Arduino обновляет данные в течение 500 мс) (Programming > Timing > Wait (ms)).

На второй блок-схеме рис. 5. представлен тот же цикл условия while loop, но две логические структуры Case установлены из положения True в False. При этом в первой структуре изменена информационная константа с TO на TF, а во второй структуре удалены индикаторы информации панели виртуального прибора.

Передняя панель виртуального прибора представлена на рис. 6.

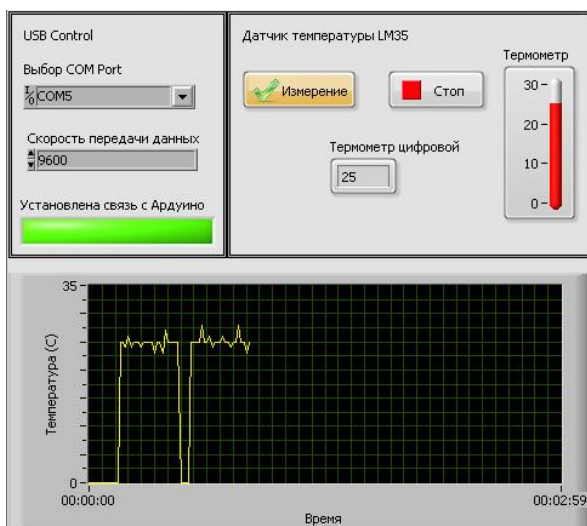


Рис. 6. Передняя панель виртуального измерительного прибора на базе LabView с использованием модуля Arduino

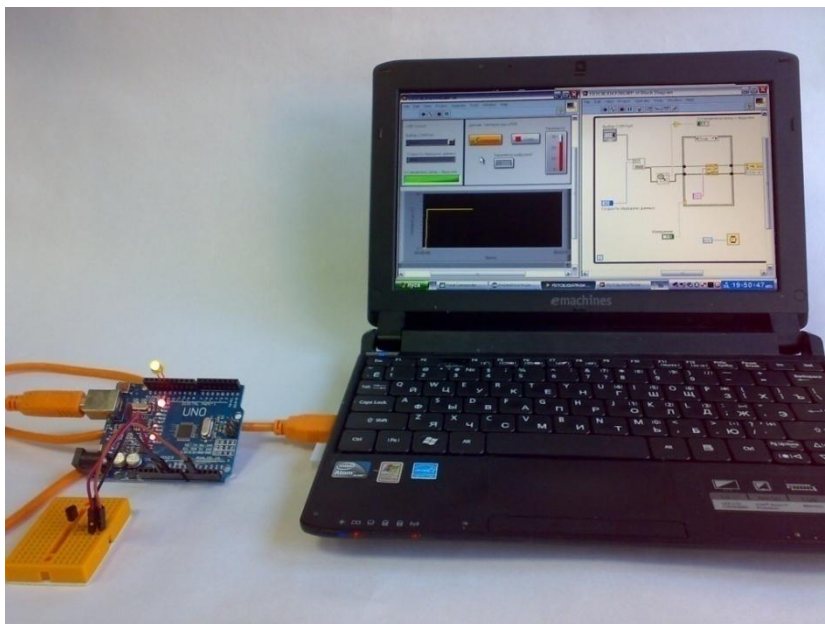
На ней устанавливается последовательный канал передачи данных COM5. В случае успешного подключения загорается индикатор связи с модулем Arduino.

При нажатии на кнопку «Измерение» происходит подключение температурного датчика на измерение, и на индикаторах наблюдается измеряемая температура в градусах Цельсия в данный момент времени, а также на графическом индикаторе наблюдается распределение температуры во времени (в секундах).

После завершения серии измерений виртуальный прибор можно отключить нажатием кнопки «Стоп».



Внешний вид измерительного лабораторного макета на базе Arduino и LabView представлен на рис. 7.



*Рис. 7.* Внешний вид измерительного лабораторного макета на базе Arduino и LabView

Аппаратно макет на рис. 7 аналогичен макету на рис. 3. Различия – в программной составляющей. Использование LabVIEW расширяет возможности стенда до создания полноценных систем измерения, контроля и управления с автоматической обработкой информации.

### **Выводы**

Разработанный вариант комбинированной программно-аппаратной платформы позволяет использовать доступный модуль Arduino в качестве интерфейса для ввода-вывода данных, а программную систему LabVIEW – в качестве алгоритмической среды для обработки этих данных.

Предложенный лабораторный практикум был разработан для учебных целей на кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. Также данный измерительный комплекс с успехом применен в дипломном проектировании в технику-

ме радиоэлектроники и информационных технологий (ТРИТ) имени А. В. Воскресенского.

### Список литературы

1. Магда, Ю. С. LabView: Практический курс для инженеров и разработчиков. – М. : ДМК, 2016. – 208 с.
2. Евдокимов, Ю. К. LabView в научных исследованиях / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М. : ДМК, 2018. – 400 с.
3. Ревич, Ю. Азбука электроники. Изучаем Arduino. – М. : Изд-во АСТ, 2017. – 224 с.
4. Белов, А. В. Arduino: От азов программирования до создания практических устройств. – М. : Наука и техника, 2018. – 480 с.

*V. O. Shamsiakhmetova*, student

College of Radio Electronics and Information Technologies  
named after A. V. Voskresensky, Izhevsk, Russian Federation

*O. Ya. Shamsiakhmetov*, senior lecturer

*V. A. Glushkov*, CSc in engineering, associate professor,  
head of “Radio Electronics Design” department

E-mail: GL@idz.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Development of Laboratory Mock-up Based on LabView and Arduino Hardware and Software Platforms

*The need to create educational lab mock-ups is confronted with the problems of equipping them with high-performance measurement modules at a reasonable price. The corresponding software is usually designed for the certain manufacturer's equipment. All this leads to an unreasonable rise in the price of software and hardware suits. The paper proposes a relatively low-cost version of the environmental temperature measuring station. It made it possible to set the configuration of virtual measurement instruments for the specified tasks independently.*

**Keywords:** software-hardware suite, LabView, Arduino, block diagram, installation of the layout, visual programming language.

---

УДК 621.31(04)

*И. В. Штенников*, канд. техн. наук, доц.

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*К. В. Кожевников*, инженер-конструктор 3-й кат.

E-mail: konstantinkoj@gmail.com

АО «ИЭМЗ «Купол»

## **Разработка повышающего преобразователя напряжения резервного источника питания климатической системы специализированного подвижного объекта**

*Выполнена разработка структурной и принципиальной электрической схемы повышающего преобразователя напряжения резервного источника питания климатической системы специализированного подвижного объекта. Проведено моделирование ее работы в NI Multisim.*

**Ключевые слова:** разработка, повышающий преобразователь напряжения, резервный источник, импульсный источник питания.

### **Введение**

В последнее время в подвижных объектах различного назначения для создания комфортных условий работы обслуживающего персонала широко используются климатические системы и устройства, обеспечивающие:

- автоматическую подачу свежего воздуха в рабочую зону персонала и удаление из нее углекислого газа и прочих продуктов различных реакций;
- обогрев или охлаждение приточного воздуха;
- поддержание заданного давления, концентрации кислорода и углекислого газа [1].

Работоспособность климатической системы тесно взаимосвязана с системой электропитания подвижного объекта, которая обеспечивает электроснабжение основных элементов и узлов оборудования этой системы [2].

К электропитанию климатических систем и его составным частям предъявляются требования повышенной надежности, безотказности, способности обеспечивать работу и поддержание жизнеспособности персонала в любых условиях [3].

### Постановка задачи

В связи с расширением географических границ эксплуатации подвижных объектов специального назначения в условиях крайнего севера и тропического климата применение климатических систем является актуальным. С целью поддержания боевой готовности экипажа в случае отключения или выхода из строя основного генератора подвижного объекта для поддержания микроклимата в его рабочей зоне необходима разработка резервного источника питания, обеспечивающего электропитание асинхронного двигателя вентилятора системы кондиционирования подвижного объекта.

Источник питания, рассмотренный в работах [4, 5], не обеспечивает необходимую выходную мощность и имеет невысокую энергоэффективность. Для улучшения характеристик и расширения возможностей резервного источника питания целесообразна разработка повышающего преобразователя напряжения DC/DC с 27,0 В бортовой сети до 310,0 В постоянного напряжения.

### Решение задачи

Структурная схема повышающего преобразователя напряжения DC/DC представлена на рис. 1.

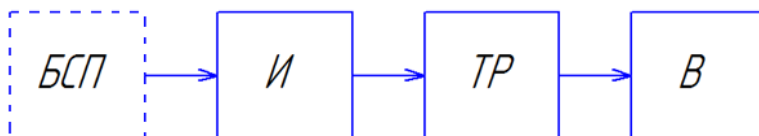


Рис. 1. Структурная схема повышающего преобразователя DC/DC: БСП – бортовая сеть, И – однофазный мостовой инвертор, ТР – импульсный трансформатор, В – однофазный мостовой выпрямитель

Постоянное напряжение бортовой сети 27,0 В поступает на инвертор (И), в котором преобразуется в переменное импульсное напряжение частотой 22,5 кГц, амплитудой 27,0 В. Это напряжение повышается импульсным трансформатором (ТР) до 330,0 В и выпрямляется при помощи однофазного мостового выпрямителя (В) до 310,0 В.

В основе повышающего преобразователя напряжения DC/DC использована мостовая схема, представленная на рис. 2. Ее применение позволит повысить мощность источника питания до 10–12 кВт, а также снизить токи в первичной цепи примерно в два раза по сравнению с полумостовой схемой [6].

Принципиальная электрическая схема разработанного преобразователя приведена на рис. 3. На микросхеме *DA2* типа КР1156ЕУ2 выполнен задающий генератор импульсов. С помощью подстроечного резистора *R6* и конденсатора *C6* задается частота выходных импульсов 22,5 кГц, амплитудой 1,5 В, которые с выводов *I1* и *I4* *DA2* поступают на входы 6 драйверов управления МД1120П-А силовыми ключами *DA3*, *DA4*.

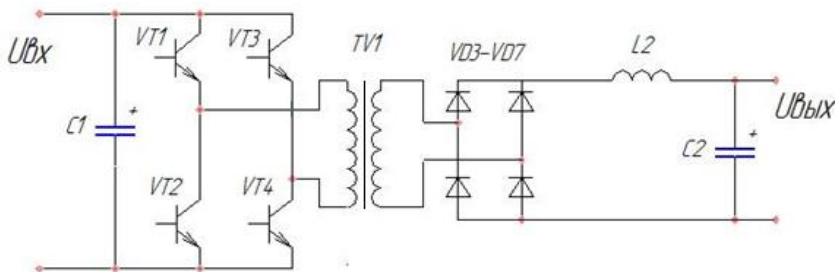


Рис. 2. Схема преобразователя постоянного напряжения

С выводов драйверов напряжение амплитудой 27,0 В поступает на полумостовые сборки *A2*, *A3* типа 5М9-400-2Т, включенные по схеме «косой мост», образующие мостовую схему. С выхода мостовой схемы на первичную обмотку импульсного трансформатора *TV1* поступает напряжение 27,0 В с частотой 22,5 кГц. Трансформатор повышает напряжение до 330 В амплитудного значения, которое с помощью мостового выпрямителя *A4* типа 5М5БВД-100-12 и *LC*-фильтра преобразуется в постоянное напряжение 310,0 В. С целью защиты первичной цепи трансформатора *TV1* от короткого замыкания применена токовая защита *TA1-VD2-VD5-DA1*. Ограничение от перенапряжения во вторичной цепи трансформатора реализовано с помощью сигнала с оптрона *U*, формирующего запрещение работы ШИМ-модуляции задающего генератора *DA2* при превышении напряжения вторичной обмотки трансформатора выше 330 В.

### Результаты и их обсуждение

В программной среде NI Multisim проведено моделирование работы основных узлов повышающего преобразователя напряжения DC/DC.

При моделировании работы задающего генератора, инвертора напряжения и однофазного выпрямителя использованы ближайшие зарубежные аналоги отечественных микросхем. На рис. 4–9 представлены схемы узлов и осциллограммы их выходных напряжений.

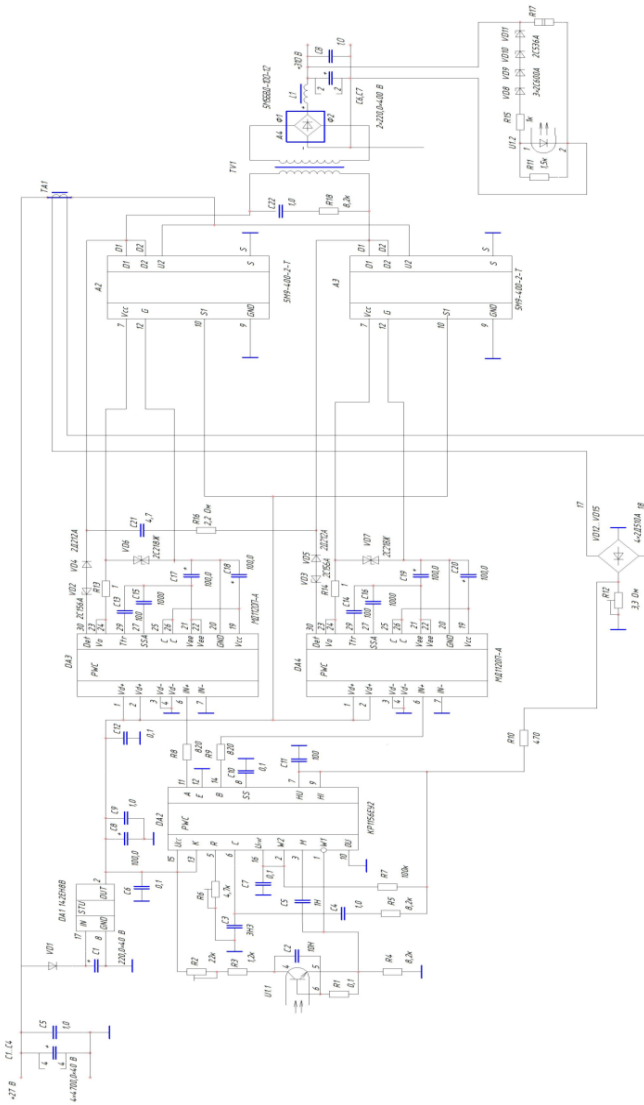


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная преобразователя повышающего напряжения

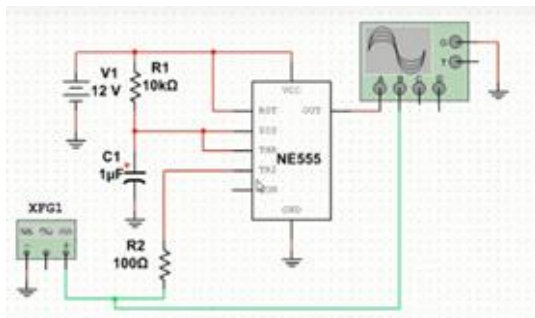


Рис. 4. Схема задающего генератора на основе таймера NE555

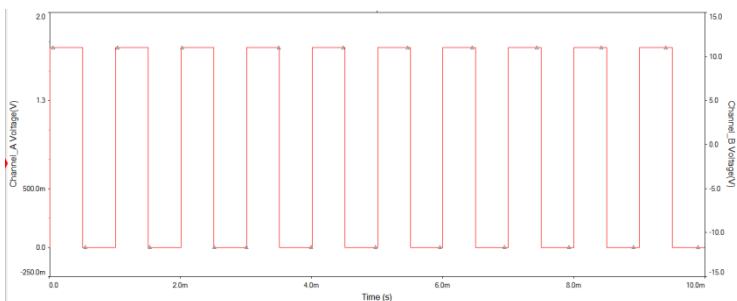


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения задающего генератора, частота 22,5 кГц, амплитуда 1,5 В

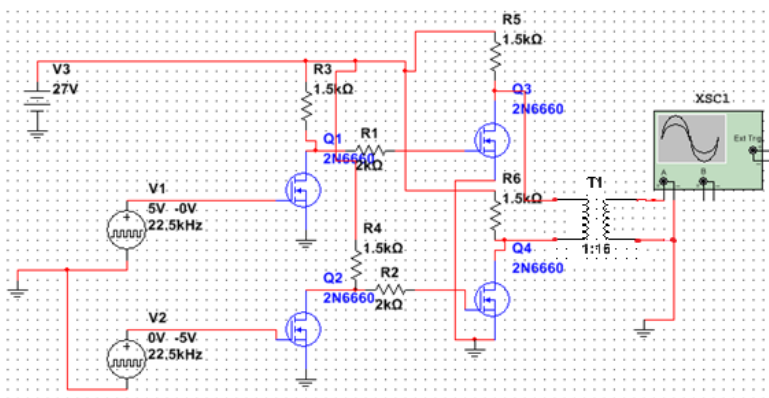


Рис. 6. Инвертор напряжения на MOSFET-транзисторах

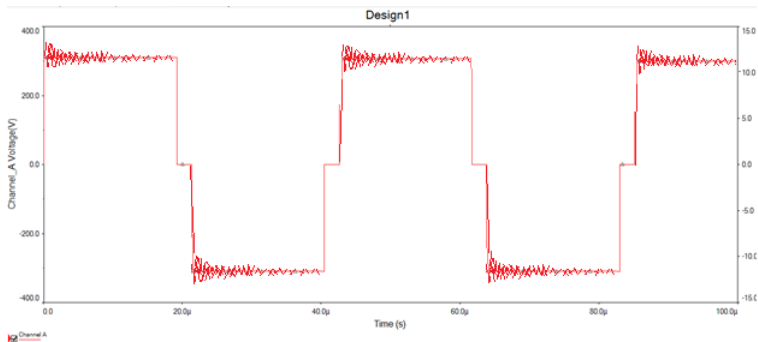


Рис. 7. Осциллограмма напряжения на выходе инвертора, частота 22,5 кГц, амплитуда 330 В

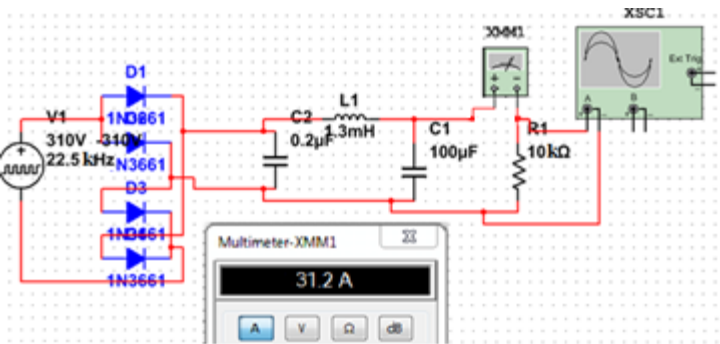


Рис. 8. Моделирование работы схемы выпрямителя

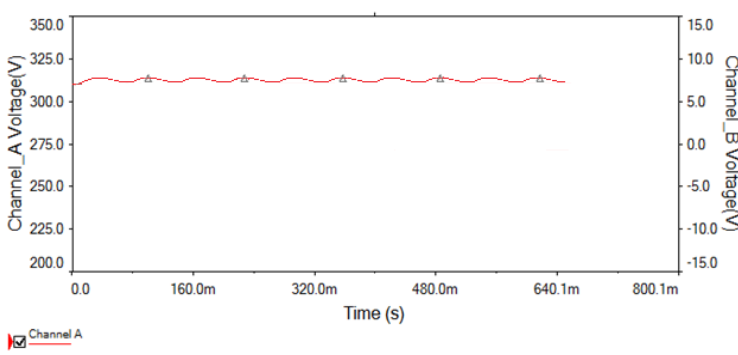


Рис. 9. Осциллограмма напряжения на выходе разработанного преобразователя DC/DC,  $U_{\text{ВЫХ}} = 310 \text{ В}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = 9,7 \text{ кВт}$



Результаты моделирования работы узлов повышающего преобразователя напряжения указывают на то, что при его разработке достигнуты необходимые параметры – преобразование постоянного напряжения бортовой сети 27,0 В в постоянное напряжение 310,0 В мощностью 9 кВт.

### **Выводы**

Разработка повышающего преобразователя напряжения DC/DC позволила обеспечить большую выходную мощность источника питания до 9 кВт, повысить его энергетические характеристики, защитить основные силовые цепи от аварийных режимов работы, а также расширить область применения изделия.

### **Список литературы**

1. *Боровков, В. С.* Аэрогидродинамика систем вентиляции и кондиционирования воздуха / В. С. Боровков, Ф. Г. Майрановский. – М. : Стройиздат, 1978. – 120 с.
2. *Гримитлин, М. И.* Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов : монография. – М. : Наука, 1978. – 331 с.
3. *Ромаш, Э. М.* Источники вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры. – М. : Радио и связь, 1981. – 358 с.
4. *Кожевников, К. В.* Источник питания асинхронного двигателя вентилятора / К. В. Кожевников, И. В. Штенников // 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. 536–538.
5. *Кожевников, К. В.* Расширение функциональных возможностей источника питания асинхронного двигателя вентилятора / К. В. Кожевников, И. В. Штенников // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн.конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 448–453.
6. *Шустов, М. А.* Практическая схемотехника, преобразователи напряжения. Кн. 3. – М. : Альтекс-А, 2002. – 190 с.

*I. V. Shtennikov*, CSc in engineering, associate professor  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation  
*K. V. Kozhevnikov*, design engineer  
АО “IEMZ “Kupol”, Izhevsk, Russian Federation

## **Development of Up-Convertor of the Voltage of the Backup Power Supply of the Climatic System of a Specialized Mobile Object**

*The development of the structural and principal electrical circuit of the voltage boosting converter of the backup power source of the climatic system of a specialized mobile object has been carried out. The modeling of its work in NI Multisim was carried out.*

**Keywords:** development, boosting voltage converter, backup source, switching power supply.

УДК 621.3(04)

*И. В. Штенников*, канд. техн. наук, доц.

*Д. А. Ложкин*, студент

*В. И. Черешев*, магистрант

E-mail: dm.lozhkin@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Методика приготовления плоских образцов из герметиков и исследование их удельного электрического сопротивления**

*Проведены исследования и выбор материалов для приготовления плоских образцов из герметиков «Экон», «HAUSER» и «MasterSil 817», исследованы их удельные объемное и поверхностное сопротивления.*

**Ключевые слова:** герметики, образцы, испытания, удельное электрическое сопротивление.

### **Введение**

В современном производстве электрических машин, силового электрооборудования и т. д. широко используются различные электроизоляционные пропиточные лаки, заливочные массы, герметики и др., которые после сушки и затвердевания способствуют повышению электрического сопротивления и электрической прочности электротехнических изделий [1].

Одной из основных характеристик изоляционных материалов является их электрическое сопротивление. Его определение производится на образцах. Согласно ГОСТ Р 50499-93 «Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения удельного объемного и поверхностного сопротивления», испытуемый образец может иметь практически любую удобную форму, позволяющую использовать третий электрод для защиты от погрешностей, связанных с поверхностными эффектами [2]. Однако стандарт не дает каких-либо рекомендаций по подготовке образцов из твердеющих, полимеризующихся жидких диэлектриков для определения их удельного электрического сопротивления.

### **Постановка задачи**

В связи с этим для оценки электроизоляционных свойств герметиков «Экон», «HAUSER» и «MasterSil 817» в работе рассматривается приго-

товление плоских образцов из данных герметиков и определение их удельного объемного и поверхностного сопротивления.

«Mastersil 817» – это силиконовый электроизоляционный герметик, является однокомпонентным, высокотемпературным герметиком нейтрального отверждения, разработан для поверхностной изоляции и герметизации аппаратуры, работающей в воздушной среде, и защиты ее от воздействия влаги при температурах до +270 °С [3].

Герметики марок «Экон» и «HAUSER» относятся к числу широко применяемых на практике [4, 5].

### **Описание эксперимента**

На основе исследований, проведенных в работах [6, 7], в качестве сопутствующих материалов для приготовления плоских образцов из герметиков использовалась декоративная самоклеящаяся пленка марки DEKORON, ее лицевая сторона и защитная пленка клеящего слоя декоративной пленки.

Перед приготовлением образцов поверхность пленки протиралась хлопчатобумажной тканью, смоченной этиловым спиртом. Затем на пленку, размещаемую на горизонтальной ровной, твердой поверхности наносилось некоторое количество герметика, поверх которого располагался второй слой пленки. Для получения равномерного по толщине образца исследуемого герметика на нем размещалось стекло большего размера с грузом. Далее образцы выдерживались в течение 5–7 суток в условиях комнатной температуры и влажности до полного затвердевания, после чего пленки аккуратно отделялись от образца.

Для каждого из полученных образцов по результатам 3–4 измерений с помощью микрометра типа МР определялась их средняя толщина.

Определение удельного объемного и поверхностного сопротивления образцов герметиков производилось по ГОСТ Р 50499-93 [2] с использованием тераомметра Е6-13А и трехэлектродной измерительной ячейки с защитным электродом. Общий вид прибора и измерительной ячейки приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид прибора и измерительной ячейки измерительная ячейка без экрана (а); ячейка с экраном (б)

Трехэлектродная ячейка содержит три электрода, изготовленные из латуни: измерительный цилиндрический, кольцевой и нижний электроды. При измерении объемного сопротивления диэлектрика кольцевой электрод заземлялся, а на нижний подавалось напряжение 100 В. При измерении поверхностного сопротивления наоборот – нижний электрод заземлялся, а на кольцевой подавалось напряжение 100 В. Измерительный электрод в обоих случаях подключался к входу тераомметра Е6-13А. Данные о параметрах электродов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трехэлектродной системы

Диаметр измерительного электрода, мм	Площадь измерительного электрода $S_1$ , мм <sup>2</sup>	Условное сечение $S_2$ , мм	Внутренний диаметр кольцевого электрода, мм	Расстояние между электродами $l$ , мм
25	490,874	84,823	29	2

Для измерения объемного и поверхностного сопротивления образец герметика помещался на нижний электрод измерительной ячейки. Сверху на него соосно устанавливались: измерительный и кольцевой электроды с зазором между собой – 2 мм. Ячейка накрывалась заземленным металлическим экраном, после чего с помощью тераомметра Е6-13А проводилось измерение объемного и поверхностного сопротивления исследуемого образца.

По результатам измерений вычислялись удельные объемное ( $\rho_V$ ) и поверхностное ( $\rho_S$ ) сопротивления по формулам, соответственно:

$$\rho_V = R_V \cdot \frac{S_1}{h}, \quad (1)$$

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{S_2}{l}, \quad (2)$$

где  $R_V$  – объемное сопротивление диэлектрика, Ом;  $S_1$  – площадь измерительного электрода, мм<sup>2</sup>;  $h$  – толщина диэлектрика, мм;  $R_S$  – поверхностное сопротивление диэлектрика, Ом;  $S_2$  – условное сечение, равное длине средней окружности между измерительным и кольцевым электродами, мм;  $l$  – расстояние между измерительным и кольцевым электродами, мм.

Определение удельных объемного и поверхностного сопротивления производилось на 2–3 образцах каждого вида герметиков по результатам трех измерений каждого образца.

### Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований выявлено, что для приготовления образцов применение декоративной самоклеящейся пленки позволило получить ровные плоские образцы герметиков HAUSER и MasterSil 817, которые легко отделялись от лицевой поверхности пленки. В ряде случаев образцы герметика MasterSil 817 имели точечное прилипание к поверхности пленки, которое устранялось погружением образцов в ванну с растворителем марки 646, после чего образец герметика легко отделялся от пленок.

При изготовлении образцов из герметика «Экон» наилучшие результаты достигнуты при использовании защитной пленки, которая легко отделялась от образца после затвердевания герметика.

Полученные образцы обладали достаточно равномерной толщиной, имели ровную, гладкую поверхность и были пригодны для определения их электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ Р 50499-93 [2]. Внешний вид образцов приведен на рис. 2.

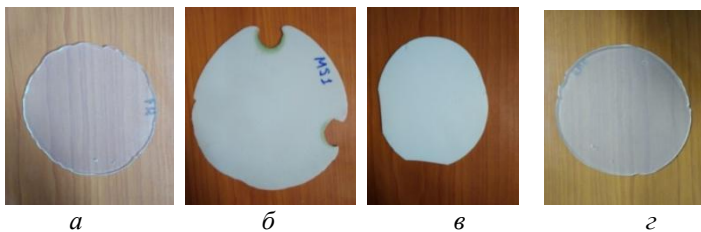


Рис. 2. Внешний вид образцов из герметиков: HAUSER (а), MasterSil 817 (б), «Экон» белый (в) и «Экон» прозрачный (г)

Результаты измерения объемного ( $R_V$ ) и поверхностного ( $R_S$ ) сопротивления исследуемых образцов герметиков и расчеты их удельного объемного ( $\rho_V$ ) и поверхностного ( $\rho_S$ ) сопротивления приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты измерений сопротивлений и расчетов удельных сопротивлений герметиков «Экон», HAUSER и MasterSil 817**

Наименование герметика	Количество образцов	Толщина, мм	Результаты измерений		Результаты вычислений	
			$R_S 10^{13}$ , Ом	$R_V 10^{13}$ , Ом	$\rho_S 10^{15}$ , Ом	$\rho_V 10^{13}$ , Ом·м
«Экон», белый	3	1,95–2,5	6–100	3–8	3–40 и более	0,8–2
«Экон», прозрачный	3	1,95–2,75	8–100 и более	9–100 и более	3–40 и более	2–20 и более
HAUSER	2	2,15–2,37	3–100 и более	4,5–100 и более	1–40 и более	1–20 и более
MasterSil 817	3	1,05–1,67	15–100 и более	13–80	6–40 и более	2–40

Исследования показали, что удельное объемное и поверхностное электрические сопротивления герметиков марок «Экон», HAUSER и MasterSil 817 по своим значениям не уступают многим электроизоляционным материалам, применяемым в производстве электротехнических изделий (табл. 3) [8]. Их значения удельного сопротивления превышают сопротивление некоторых видов стекла, текстолита, гетинакса, оргстекла, бакелита, сухой бумаги. Соответствуют значениям сопротивления кварца, фарфора, битума, шеллака, слюды, поливинилхлорида, полиэтилена, каучука и уступают только парафину и полистиролу (табл. 2 и 3).

**Таблица 3. Удельное электрическое сопротивление некоторых диэлектриков**

Наименование диэлектрика	$\rho_V$ , Ом·м	Наименование диэлектрика	$\rho_V$ , Ом·м
Стекло	$10^6$ – $10^{15}$	Битум	$10^{13}$ – $10^{14}$
Текстолит	$10^7$ – $10^8$	Шеллак	$10^{13}$ – $10^{14}$
Гетинакс	$10^8$ – $10^9$	Слюда	$10^{14}$
Плексиглас (оргстекло)	$10^{11}$	Полихлорвинил	$10^{14}$
Бакелит	$10^{11}$ – $10^{12}$	Полиэтилен	$10^{14}$
Бумага сухая	$10^{11}$ – $10^{12}$	Каучук	$10^{14}$
Кварц	$10^{12}$ – $10^{13}$	Парафин	$3 \cdot 10^{16}$
Фарфор	$10^{13}$	Полистирол	$10^{15}$ – $10^{17}$

Таким образом, благодаря высоким значениям удельных сопротивлений, герметики «Экон», HAUSER и MasterSil 817 можно использовать в качестве электроизоляционных материалов с целью повышения элек-

трического сопротивления и электрической прочности электротехнических изделий.

### Заключение

В результате проведенных исследований материалов, пригодных для приготовления плоских образцов из герметиков марок «Экон», HAUSER и MasterSil 817, выбрана лицевая сторона самоклеющейся декоративной пленки марки DEKORON и защитная пленка клеящего слоя декоративной пленки.

По разработанной методике изготовлены плоские образцы из герметиков, проведены измерения их объемного и поверхностного сопротивления по ГОСТ Р 50499-93 с помощью тераомметра Е6-13А и трехэлектродной измерительной системы, вычислены их удельные объемные и поверхностные сопротивления.

Полученные высокие значения удельных сопротивлений показали возможность применения герметиков «Экон», HAUSER и MasterSil 817 в качестве электроизоляционных материалов.

### Список литературы

1. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
2. ГОСТ Р 50499-93. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения удельного объемного и поверхностного сопротивления [Электронный ресурс]. – Введ. 1994–01–01. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200026092> (дата обращения 14.06.2018).
3. Силиконовый электроизоляционный герметик «MasterSil 817» [Электронный ресурс]. – URL: <http://mastersil.ru/files/catalog/annotatsii/817.pdf> (дата обращения: 14.06.2018).
4. Силиконовый санитарный герметик «Экон» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.germ.ru/obj/0/0/711/> (дата обращения: 14.06.2018).
5. Силиконовый универсальный герметик «HAUSER» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mirgermetikov.ru/product/hauser-germetik-silikonovyy-universalnyu-260ml> (дата обращения: 14.06.2018).
6. Штенников, И. В. Методика приготовления образцов из жидкой изолянт-ты «Nano 4 Premium» для исследования ее электрической прочности / И. В. Штенников, В. И. Черешев // Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 504–509.
7. Черешев, В. И. Разработка методики приготовления образцов и исследование электрической прочности жидких диэлектриков после их затвердевания / В. И. Черешев, И. В. Штенников // Молодежь и научно-технический прогресс:



---

сб. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. (19 апр. 2018 г.) – Губкин ; Старый Оскол : Ассистент плюс, 2018. – Т. 1. – С. 201–204.

8. Удельное сопротивление некоторых диэлектриков [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.calc.ru/603.html> (дата обращения: 14.06.2018).

*I. V. Shtennikov*, CSc in engineering, associate professor

*D. A. Lozhkin*, student

*V. I. Chereshev*, magister student

E-mail: [dm.lozhkin@gmail.com](mailto:dm.lozhkin@gmail.com)

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation

### **Method of Preparation of Flat Samples from Sealants and the Research of Their Specific Electrical Resistance**

*Investigations and selection of materials for the preparation of flat samples from the sealants "Econ", "HAUSER" and "MasterSil 817", investigated their specific volume and surface resistances.*

**Keywords:** sealants, samples, tests, specific electrical resistance.

## Секция 2. Приборы в промышленности, здравоохранении и экологии

УДК 534.16+620.179.16

*К. Е. Аббакумов*, д-р техн. наук, проф.

*Н. В. Степаненко*, ассистент

E-mail: NVStepanenko@etu.ru

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

### **Распространение крутильных волн в двухслойной трубе**

*Рассмотрено распространение крутильных волн в двухслойной трубе. Получено дисперсионное уравнение. На примере численного решения дисперсионного уравнения показано возможное поведение дисперсионных кривых. Даны рекомендации по учету выявленных закономерностей при создании ультразвуковых методов контроля, основанных на распространении крутильных волн.*

**Ключевые слова:** нормальные волны, крутильные волны, неразрушающий контроль, ультразвук, труба, дисперсионные кривые.

#### **Введение**

Двухслойные трубы получают все более широкое распространение в различных областях промышленности и хозяйственной деятельности. В зависимости от необходимых свойств могут быть использованы как биметаллические изделия, так и металлические трубы с покрытием из полимерных материалов. Так, например, все чаще в качестве пульпопроводов гидротранспортировки в добывающей промышленности используют трубы с износостойким внутренним слоем и внешним слоем из низкоуглеродистой стали (сочетание стали 30Л и стали Х12). Применение такого класса изделий обусловлено особыми условиями эксплуатации, такими как повышенная температура, агрессивная среда, повышенное давление, и зачастую имеют ограниченный доступ, ввиду чего невозможно использовать методы контроля, предполагающие полное сканирование поверхности, без полного извлечения изделия из рабочей

среды. Однако в ряде работ, как отечественных, так и зарубежных, была показана эффективность волноводных методов контроля, в том числе методов, основанных на распространении крутильных волн для сплошного контроля труб, без полного доступа.

### Постановка задачи

В применении к двухслойным трубам важно учитывать взаимодействие внутреннего и внешнего слоев. В работе [1] показано влияние такого взаимодействия для продольных волн, из результатов видно, что дополнительные слои существенно влияют на характер дисперсионных кривых. В работе [2] представлена программа GUIGUV, позволяющая методом конечных элементов получить семейство дисперсионных кривых для различных типов волн, для протяженных моделей разного поперечного сечения, в том числе и двухслойной трубы, с произвольными свойствами материалов.

В настоящей работе рассмотрено распространение крутильных волн в двухслойной трубе. Таким образом, формируются предпосылки с учетом возможного нарушения качества контакта между слоями, для обнаружения как расслоений в двухслойной трубе, так и для получения дополнительных информативных параметров при обнаружении дефектов типа расслоения в однородной трубе.

Рассмотрим двухслойную бесконечную трубу внутренним диаметром  $2a$ , внешним –  $2c$ , граница между слоями имеет диаметр  $2b$ . Оси цилиндрических координат расположим так, чтобы ось  $z$  совпала с осью трубы. Пространство внутренней трубы обозначим индексом  $I$ , внешней –  $II$ .

### Решение задачи

Для описания распространения колебаний в представленном объекте воспользуемся подходом, предложенным Газисом в работе [3] и Веремеенко, Каплан в [4]. Для этого запишем решения уравнения движения относительно потенциальных функций через векторный ( $\mathbf{A}$ ) и скалярный ( $\varphi$ ) потенциалы в цилиндрических системах координат  $r, z, \theta$  с учетом калибровочной инвариантности векторного потенциала:

$$\begin{aligned}
 f_I(r) &= A_1 Z_n(\alpha_I r) + A_2 W_n(\alpha_I r), \\
 h_{zI}(r) &= A_3 Z_n(\beta_I r) + A_4 W_n(\beta_I r), \\
 h_{\theta I}(r) &= A_5 Z_n(\beta_I r) + A_6 W_n(\beta_I r), \\
 f_{II}(r) &= A_7 Z_n(\alpha_{II} r) + A_8 W_n(\alpha_{II} r), \\
 h_{zII}(r) &= A_9 Z_n(\beta_{II} r) + A_{10} W_n(\beta_{II} r), \\
 h_{\theta II}(r) &= A_{11} Z_n(\beta_{II} r) + A_{12} W_n(\beta_{II} r).
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $Z_n$  представляет собой либо функцию Бесселя первого рода  $n$ -го порядка при действительном аргументе  $J_n$ , либо модифицированную функцию Бесселя первого рода  $n$ -го порядка  $I_n$  при мнимом аргументе, аналогичным образом определяется  $W_n$  как функция Бесселя второго рода  $n$ -го порядка  $Y_n$  либо модифицированная функция Бесселя второ-

го рода  $n$ -го порядка  $K_n$ ,  $\alpha_{I,II}^2 = \frac{\omega^2}{C_{II,II}^2} - \gamma^2$ ,  $\beta_{I,II}^2 = \frac{\omega^2}{C_{II,II}^2} - \gamma^2$ ,  $\omega = 2\pi f$

– циклическая частота колебаний,  $n$  – угловой индекс моды колебаний ( $n = 0, 1, \dots, N$ ),  $\gamma = \omega/c$  – волновое число.

Поле смещения в упругой трубе выражается функциями:

$$\begin{cases}
 U_{rI,II} = (f'_{I,II} + \frac{n}{r} h_{zI,II} + \gamma h_{rI,II}) \cos(n\theta) \cos(\omega t + \gamma z), \\
 U_{\theta I,II} = (-\frac{n}{r} f_{I,II} - h'_{zI,II} + \gamma h_{rI,II}) \sin(n\theta) \cos(\omega t + \gamma z), \\
 U_{zI,II} = (-\gamma f_{I,II} - \frac{n+1}{r} h_{rI,II} - h'_{rI,II}) \cos(n\theta) \sin(\omega t + \gamma z).
 \end{cases} \tag{2}$$

Компоненты тензора напряжения связаны с компонентами тензора деформации законом Гука, отсюда получим:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rrI,II} &= \left\{ -\lambda_{I,II} (\alpha_{I,II}^2 + \gamma^2) f_{I,II} + 2\mu_{I,II} \left[ f_{I,II}'' + \frac{n}{r} \left( h'_{zI,II} - \frac{1}{r} h_{zI,II} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \gamma h'_{rI,II} \right] \right\} \cos(n\theta) \cos(\omega t + \gamma z), \\
\sigma_{r\theta I,II} &= \mu_{I,II} \left[ \frac{2n}{r} \left( \frac{1}{r} f_{I,II} - f'_{I,II} \right) + \left( \beta_{I,II}^2 h_{zI,II} - 2h'_{zI,II} \right) + \gamma \left( h'_{rI,II} - \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{n+1}{r} h_{rI,II} \right) \right] \sin(n\theta) \cos(\omega t + \gamma z), \\
\sigma_{rzI,II} &= \mu_{I,II} \left[ -2\gamma f'_{I,II} - \frac{n\gamma}{r} h_{zI,II} - \frac{n}{r} h'_{rI,II} - \left( \frac{n^2 - n - 1}{r^2} - \beta_{I,II}^2 + \gamma^2 \right) \times \right. \\
&\quad \left. \times h_{rI,II} \right] \cos(n\theta) \sin(\omega t + \gamma z).
\end{aligned} \tag{3}$$

Для составления дисперсионного уравнения воспользуемся граничными условиями, согласно которым на свободной поверхности цилиндра компоненты тензора напряжения равны нулю, а также компоненты тензора напряжения и компоненты смещений равны между собой на границе раздела:

$$\begin{aligned}
(\sigma_{rrI} = \sigma_{rzI} = \sigma_{r\theta I}) \Big|_{r=a} &= 0, \\
(\sigma_{rrII} = \sigma_{rzII} = \sigma_{r\theta II}) \Big|_{r=c} &= 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{rrI} &= \sigma_{rrII} \\
\sigma_{rzI} &= \sigma_{rzII} \\
\sigma_{r\theta I} &= \sigma_{r\theta II} \\
U_{rI} &= U_{rII} \\
U_{zI} &= U_{zII} \\
U_{\theta I} &= U_{\theta II}
\end{aligned} \Bigg|_{r=b} \tag{5}$$

Подставив (2), (3) в граничные условия (4) и (5), получим систему:

$$|D_{i,j}| = 0, \tag{6}$$

где  $D_{i,j}$  ( $i, j = 1..12$ ) – коэффициенты, определяющие дисперсионное уравнение.

Принимая  $n = 0$ , что соответствует случаю осесимметричных колебаний, рассматриваемых в этой работе, получим, подобно тому, как это сделано в работе [4], поблочню диагонализированный определитель. Таким образом, исходный определитель (6) сводится к произведению определителей восьмого и четвертого порядков:

$$|D_{i,j}| = |R_{l,m}| \cdot |T_{p,q}|, \quad (7)$$

где  $l, m = 1..8$ ;  $p, q = 1..12$ . Таким образом, исходное уравнение разбивается на два:

$$\begin{aligned} |R_{l,m}| &= 0, \\ |T_{p,q}| &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Не сложно видеть, что подопредетель  $|R_{l,m}|$  описывает симметричные колебания внутренней и внешней трубы, в то время как  $|T_{p,q}|$  крутильные колебания. Таким образом, в двухслойной трубе, как и в однородной трубе, крутильные колебания отделяются от симметричных.

Компоненты подопредетеля  $|T_{p,q}|$ , отличные от нуля:

$$\begin{aligned} T_{1,1} &= -Z_0'(\beta_{II}b), & T_{1,2} &= -W_0'(\beta_{II}b), \\ T_{1,3} &= Z_0'(\beta_Ib), & T_{1,4} &= -W_0'(\beta_Ib), \\ T_{2,1} &= -\mu_{II}\beta_{II}^2 Z_2(\beta_{II}b), & T_{2,2} &= -\mu_{II}\beta_{II}^2 W_2(\beta_{II}b), \\ T_{2,3} &= \mu_I\beta_I^2 Z_2(\beta_Ib), & T_{2,4} &= \mu_I\beta_I^2 W_2(\beta_Ib), \\ T_{3,1} &= \mu_{II}\beta_{II}^2 Z_2(\beta_{II}c), & T_{3,2} &= \mu_{II}\beta_{II}^2 W_2(\beta_{II}c), \\ T_{4,3} &= \mu_I\beta_I^2 Z_2(\beta_Ia), & T_{4,4} &= \mu_I\beta_I^2 W_2(\beta_Ia). \end{aligned} \quad (9)$$

### Результаты и их обсуждение

Можно увидеть, что в случае отсутствия одной из труб ( $\mu_I = 0$  или  $\mu_{II} = 0$ ) дисперсионное уравнение приобретает вид уравнения для однослойной трубы. Взаимное влияние волн в трубах описывается коэффициентами  $T_{1,q}$ .

Подход аналитического и численного решения вопросов распространения крутильных волн, показанный в настоящей работе, можно применить для труб с большим количеством слоев в случае необходимости.

Для качественного анализа полученных выражений произведены расчеты для двухслойной трубы внешним диаметром 60 мм, толщиной стенок внешней и внутренней труб 5 мм, внешняя труба из стали 30Л, внутренняя – Х12 ( $\mu_I = 74 \cdot 10^9$  Па,  $\mu_{II} = 86 \cdot 10^9$  Па,  $\rho_I = 7700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{II} = 7810$  кг/м<sup>3</sup>).

Результаты расчета представлены на рис. 1. Как и в случае с композиционным стержнем [4], изменения дисперсионных кривых носят не только количественный, но и качественный характер. Видно, что первая мода  $T(0,1)$  бездисперсионна в однородных трубах, однако в случае двухслойной трубы связанная мода обладает заметной дисперсией. Также заметно появление мод в области меньших волновых размеров и существенное изменение характера дисперсионных кривых для мод более высокого порядка, связанное с взаимодействием мод внешней и внутренней труб.

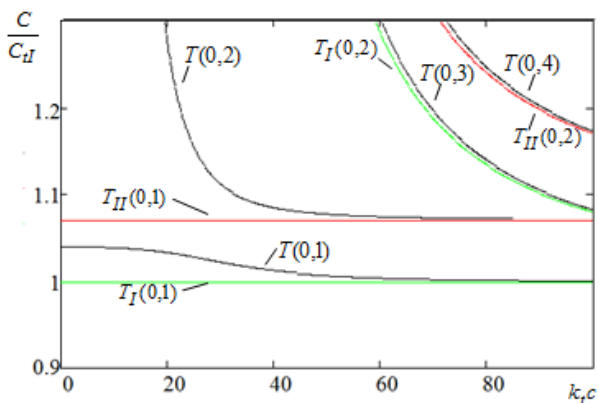


Рис. 1. Дисперсионные кривые в двухслойной трубе и в однородных свободных трубах, составляющих ее

Дополнительно в работе оценивалось влияние жесткости контакта между слоями в исследуемой трубе. Стоит отметить, что при ультразвуковом контроле крутильными волнами учет этого параметра позволит не только создать предпосылки для обнаружения расслоений в двух-

слойных объектах, но и получить дополнительный информативный параметр при обнаружении кольцевых трещин в однородных трубах.

### **Вывод**

Выявленные закономерности могут оказать существенное влияние на интерпретацию результатов контроля двухслойных труб при помощи крутильных волн, и поэтому их стоит учитывать как при создании методов и средств контроля, так и при обработке результатов измерений.

### **Список литературы**

1. *Barshinger, J. N.* Guided wave propagation in an elastic hollow cylinder coated with a viscoelastic material / J. N. Barshinger, J. L. Rose // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2004. – Vol. 51, no. 11. – Pp. 1547–1556.
2. *Bocchini, P.* Graphical user interface for guided acoustic waves / P. Bocchini, A. Marzani, E. Viola // Journal of Computing in Civil Engineering, 2011. – Vol. 25, no. 3. – Pp. 202–210.
3. *Gazis, D. C.* Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders // Journal of the Acoustical Society of America, 1959. – Vol. 31, no. 5. – Pp. 568–578.
4. *Каплан, М. Д.* Распространение нормальных волн в композиционном (двуслойном) стержне / М. Д. Каплан, С. В. Веремеенко // Дефектоскопия. – 1987. – № 12. – С. 78–87.

*K. E. Abbakumov*, DSc in engineering, professor  
*N. V. Stepanenko*, assistant  
E-mail: NVStepanenko@etu.ru  
Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”,  
Saint Petersburg, Russian Federation

### **Torsional Waves Scattering in a Two-Layer Pipe**

*The scattering of torsional waves in a two-layer pipe is studied. The dispersion equation is obtained. The example of a numerical solution of the dispersion equation shows the possible behavior of dispersion curves. Recommendations are given to take account of the revealed regularities for creating ultrasonic testing methods based on the propagation of torsional waves.*

**Keywords:** guided waves, torsional waves, non-destructive testing, ultrasonic, pipe, dispersion curves.



---

УДК 669.539.382

*В. В. Белых*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: bil\_ha@mail.ru

*В. В. Муравьев*, д-р техн. наук, проф.

E-mail: pmkk@istu.ru

*В. А. Степанов*, канд. техн. наук, зав. лабораторией

E-mail: vladimir1@udm.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Прогнозирование эксплуатационных характеристик рельсовой стали на основе нелинейной динамики**

*Изучена взаимосвязь твердости и мультифрактальных параметров изображения структур металла рельсовой стали при различных наработках грузоперевозок в миллионах тонн. Мультифрактальные параметры структуры, как и механические свойства рельсовой стали, находятся в нелинейной зависимости от величины грузоперевозок. На основе нелинейной динамики рассматривается математическая модель (ММ), описывающая эволюцию неоднородности структуры металла и ее критические состояния на различных глубинах от контактной поверхности головки рельс, в зависимости от наработки. Расчеты на основании ММ позволяют оценить эксплуатационный ресурс рельсовой стали.*

**Ключевые слова:** мультифрактал, рельсовая сталь, микроструктура, наработка грузоперевозок, неоднородность, математическая модель, прогнозирование, бифуркация.

### **Введение**

Рельсовая сталь содержит: колонии пластинчатого перлита, зерна феррито-карбидной смеси и зерна структурно-свободного феррита, их соотношение зависит от типа термообработки и изменения химического состава. Циклические нагрев и охлаждение в интервале температур вблизи  $A_{C1}$ , пластическая деформация в процессе перлитного превращения приводят к сфероидизации и коалесценции цементитных частиц и образованию зернистого перлита, что приводит к росту неоднородности и неравновесности структуры [1].

Неравновесность состояний динамических систем вызывает их переход в периодические неустойчивые или устойчивые состояния, которые изучаются методами нелинейной динамики (синергетика и принцип фрактального самоподобия) [2]. Эффекты синергизма, возникающие в условиях структурных изменений при деформации, оказывают влияние

на корреляцию механических свойств и микроструктуры перлитных сталей.

В материаловедении для получения общеструктурных количественных параметров и возможности управления свойствами материалов в критических состояниях используется мультифрактальный анализ [3].

Мультифрактальный анализ оптического изображения структуры выявляет спектр обобщенных размерностей Реньи  $D_q$ , меру скрытой упорядоченности  $\Delta D = D_{-40} - D_{+40}$  и меру скрытой периодичности  $K_s = D_1 - D_{40}$ , где  $D_1$  – информационная энтропия, экстремальные размерности  $D_{-40}$  и  $D_{+40}$  отвечают различной степени разреженности мультифрактального множества,  $q = [-40, +40]$  – управляющий параметр. Эти параметры определяются структурной неоднородностью [4, 5]. В работах научной школы В. В. Муравьева изучается влияние неоднородностей структуры на выработку ресурса рельсовой стали [6].

### **Постановка задачи**

Используя мультифрактальную параметризацию структуры шлифов рельсовой стали, выявить количественную оценку структурной неоднородности и изучить ее корреляцию с твердостью при различных наработках. Разработать математическую модель эволюции структурной неоднородности рельсовой стали для установления эксплуатационного ресурса.

### **Предмет исследования**

Изображения структур шлифов рельсовой стали на расстояниях 2, 10, 20 мм от контактной поверхности головки рельса, полученных во время эксперимента с различной наработкой (0, 400, 600, 840, 990 млн т брутто) при увеличении в 500 раз [6].

### **Описание метода оценки структурной неоднородности**

С помощью компьютерной программы расчета оптической плотности изображения в структуре шлифов определяли распределение: содержания перлитных зерен; оптической плотности; общее количество пикселей в зависимости от наработки в млн т брутто [7, 8].

Оценка неоднородности структур исследовалась на основе динамики спектра мультифрактальных параметров:

$$\varepsilon = \frac{D_{-40} - D_{+40}}{D_{-40} + D_{+40}}.$$

Результаты обработки изображения шлифов представлены на рис. 1–4. С увеличением расстояния от контактной поверхности, на шлифах возрастает количество феррита, что сопровождается ростом оптической плотности (рис. 1).

При наработке 400 млн т брутто возрастает средняя оптическая плотность, уменьшается количество пикселей и процентное содержание перлита. Твердость в поверхностном слое максимальна. При наработке 600 млн т брутто возрастает количество пикселей, процентное содержание перлита, снижается величина средней оптической плотности и твердость. С дальнейшим увеличением наработки прослеживается тенденция небольших колебаний и сближений исследуемых характеристик: оптическая плотность стремится к величине 80–90, количество серых пикселей стремится к 2000–3000, содержание перлита – 70–80 %, твердость НВ – 340–380.

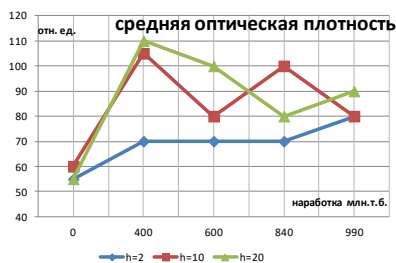


Рис. 1. Средняя оптическая плотность

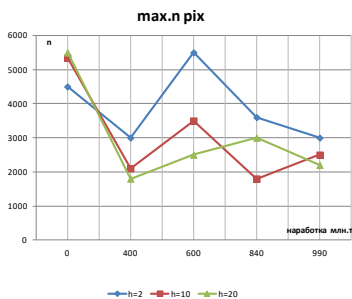


Рис. 2. Максимальное количество пикселей

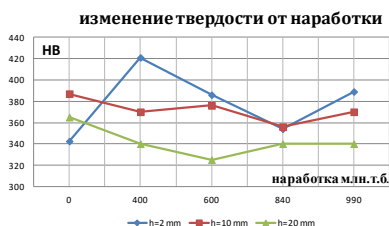


Рис. 3. Изменение твердости в зависимости от наработки

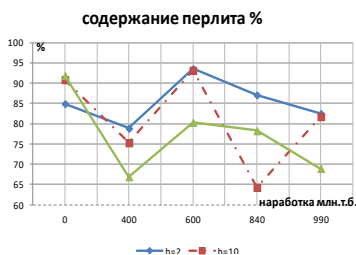


Рис. 4. Содержание перлита

Эксплуатация рельсов сопровождается разрушением пластин цемента, максимальное разрушение происходит в слое рельсов толщиной не более 2 мм [1] и сопровождается возрастанием числа пикселей (рис. 2) и процентного содержания перлита (рис. 4). Появление зернистого перлита приводит к снижению твердости (рис. 3).

### Результаты МФП структуры шлифов рельсовой стали

Меры упорядоченности  $\Delta D$  и фрактальная размерность  $D_{.40}$  шлифов приводятся на рис. 5. Из резонансного изменения  $\Delta D$  можно установить динамику колебаний размера статистического элемента мультифрактала (пиксель): в исходной структуре – 8 пикс., при наработке 400 млн т брутто – 40 пикс., при наработке 600 млн т брутто – 14 пикс., при наработке 990 млн т брутто – 15 пикс.

При наработке 400 млн т брутто в структуре наблюдается «сверхдальний порядок», характерный для квазикристаллической структуры, обладающей свойствами агломерации и в силу этого формирующей нечто вроде колоний. В нашем случае квазикристаллической фазой является цементит.

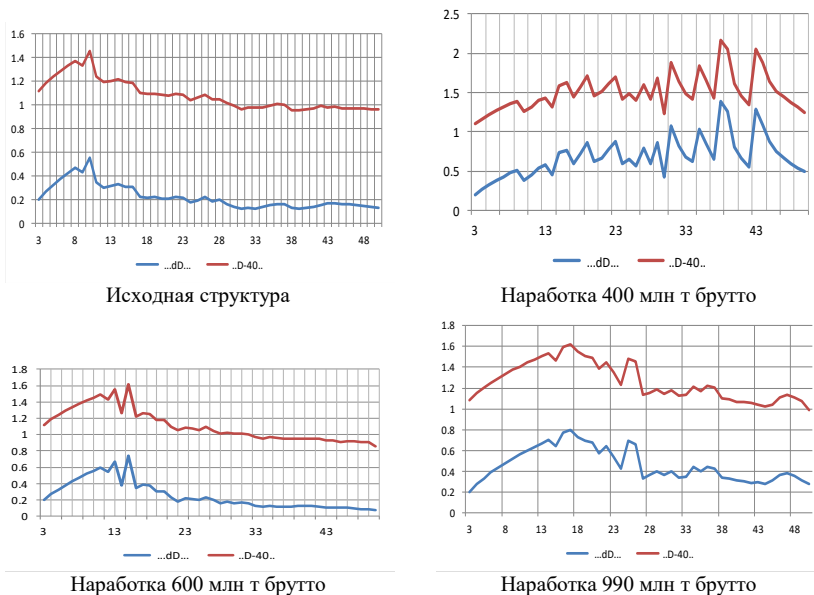


Рис. 5. Информационные резонансы  $\Delta D$  и фрактальная размерность  $D_{.40}$  при МФП структуры шлифов

Результаты МФП структуры шлифов рельсовой стали в зависимости от наработки миллионов тонн брутто представлены в табл. 1.

Наблюдается экстремальный характер изменения средних значений структурных параметров  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $\Delta D$ ,  $K_s$ ,  $\varepsilon$ , что свидетельствует о структурных перестройках в слоях  $h = 2 \div 20$  мм при эксплуатации рельсов. Изменения структурных параметров находятся в корреляционной связи с твердостью слоев НВ.

Структурная неоднородность возрастает при наработке 400 млн т брутто, при этом параметры  $D_0$ ,  $D_1$  снижаются, возрастает мера упорядоченности  $\Delta D$  в слоях 10 и 20 мм (табл. 1). Мера периодичности  $K_s$ , возрастает в поверхностном слое вдвое и в 20–40 раз по сравнению с исходной структурой на глубине 10–20 мм.

**Таблица 1. Результаты МФП структуры рельсовой стали при различной наработке**

$h = 2$ мм					
Нарботка, млн т брутто	0	400	600	840	990
НВ	342,5±9	421±7	386±4	354±4	389±2
$D_0$	1,911	1,892	1,907	1,907	1,898
$D_1$	1,907	1,884	1,903	1,900	1,881
$\Delta D$	0,494	0,667	0,551	0,534	0,618
$K_s$	0,008	0,016	0,009	0,019	0,039
$\varepsilon$	0,130	0,168	0,124	0,122	0,143
$h = 10$ мм					
Нарботка, млн т брутто	0	400	600	840	990
НВ	387±4	370±6	376±5	356±7	370±8
$D_0$	1,920	1,854	1,908	1,903	1,910
$D_1$	1,918	1,784	1,895	1,89	1,904
$\Delta D$	0,371	0,987	0,51	0,54	0,494
$K_s$	0,007	0,174	0,033	0,033	0,013
$\varepsilon$	0,1	0,230	0,119	0,126	0,113
$h = 20$ мм					
Нарботка, млн т брутто	0	400	600	840	990
НВ	365	340	325	340	340
$D_0$	1,916	1,824	1,906	1,913	1,899
$D_1$	1,916	1,734	1,901	1,909	1,886
$\Delta D$	0,341	1,007	0,525	0,472	0,589
$K_s$	0,004	0,176	0,012	0,010	0,023
$\varepsilon$	0,082	0,240	0,121	0,109	0,133

### Математическая модель

В открытой системе, выведенной из состояния равновесия (металл рельсов, подвергаемый мегапластической деформации при эксплуатации), возможны структурные и фазовые переходы. Эти переходы сопровождаются процессами внутренней самоорганизации (мультифрактальная упорядоченность) и связаны с формированием диссипативных структур (мультифракталов) [9, 10]. Диссипативные структуры – высокоупорядоченные самоорганизующиеся образования в далеких от равновесия системах, обладающие определенной формой и характерными пространственно-временными размерами; они устойчивы относительно малых возмущений [11]. В поведении нелинейной динамической системы наблюдается обратная связь, для которой характерно, что предыдущий результат контролирует последующий независимо от типа системы и масштабного уровня. Это позволяет динамической системе при ее эволюции сохранять устойчивость [12].

Предположим, что в ограниченном объеме максимально возможная структурная неоднородность распределения дефектов определенного вида (пластинчатый цементит в перлитной колонии) –  $\varepsilon_{\max}$ .

В начальный момент состояние структуры определяется оценкой структурной неоднородности в интервале от 0 до  $\varepsilon_{\max}$ . В результате интенсивной пластической деформации металла увеличивается структурная неоднородность. Скорость увеличения неоднородности характеризуется параметром  $\alpha > 0$ . Обозначим структурную неоднородность  $\varepsilon_n$  для  $n$ -го интервала наблюдений и запишем изменение структурной неоднородности для  $n+1$  интервала в виде формулы [13]:

$$\varepsilon_{n+1} = \alpha \varepsilon_n (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_n), n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Для упрощения уравнения (1) поделим правую и левую части на  $\varepsilon_{\max}$  и заменим переменные:

$$\frac{\varepsilon_{n+1}}{\varepsilon_{\max}} = \varepsilon_{\max} \alpha \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\max}} \left( 1 - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\max}} \right).$$

Введем новые обозначения:  $X_n = \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{\max}}, \lambda = \varepsilon_{\max} \alpha$ .

Полученное уравнение называется логистическим:

$$X_{n+1} = \lambda \cdot X_n (1 - X_n),$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots; X_n \in [0; 1]$ .

**Таблица 2. Параметры  $\lambda$ , структурные неоднородности  $\varepsilon_n$ , переменные  $X_n$  на различной глубине слоя  $h$**

Наработка, млн т брутто	0	400	600	840	990	$\varepsilon_1 = 0,115$ $\varepsilon_2 = 0,165$ $\varepsilon_{\max} =$ 0,2122
$h = 2$ мм						
$\varepsilon_n$	0,1304	0,1684	0,1243	0,1220	0,1430	$\varepsilon_{\max} =$ 0,2122
$X_n$	0,6145	0,7936	0,5855	0,5749	0,6739	
$\lambda$	–	3,35	3,57	2,37	2,75	
$h = 10$ мм						
$\varepsilon_n$	0,0995	0,23	0,11887	0,1260	0,1133	$\varepsilon_1 = 0,133$ $\varepsilon_2 = 0,23$ $\varepsilon_{\max} =$ 0,2746
$X_n$	0,3624	0,8376	0,4323	0,4589	0,4126	
$\lambda$	–	3,6	3,2	1,9	1,7	
$h = 20$ мм						
$\varepsilon_n$	0,2880	0,8475	0,4259	0,3846	0,4716	$\varepsilon_1 = 0,125$ $\varepsilon_2 = 0,24$ $\varepsilon_{\max} =$ 0,2828
$X_n$	0,0815	0,2397	0,1205	0,1088	0,1334	
$\lambda$	–	4,1	3,2	1,6	2,0	

В табл. 2 приводятся дискретные значения структурной неоднородности  $\varepsilon_n$  и переменной  $X_n = \varepsilon_n / \varepsilon_{\max}$  для различных наработок, значения параметра  $\lambda$  модели:  $X_{n+1} = \lambda X_n (1 - X_n)$ .

В результате работы ММ получены два устойчивых решения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , максимальная величина структурной неоднородности  $\varepsilon_{\max}$  для каждого слоя  $h$ . Можно отметить снижение  $\varepsilon$  при увеличении наработки, что, вероятно, связано с образованием однородной структуры изображения рельсовой стали в условиях ее деградации. Оценка  $\varepsilon_{\max 1} = 0,212$  для  $h = 2$  мм и  $\varepsilon_{\max 2} = 0,283$  для  $h = 20$  мм может использоваться для прогнозирования адаптационных свойств рельсовой стали и критических состояний при дальнейшей эксплуатации в условиях деградации структуры (рис. 6).

На рис. 7 представлена структурная бифуркация  $\varepsilon$  при  $3 < \lambda < 4$ .

Решению  $\varepsilon_1$  соответствует нижняя ветвь, решению  $\varepsilon_2$  соответствует верхняя ветвь бифуркационной кривой. В область хаоса (окрашена серым) попали три результата.

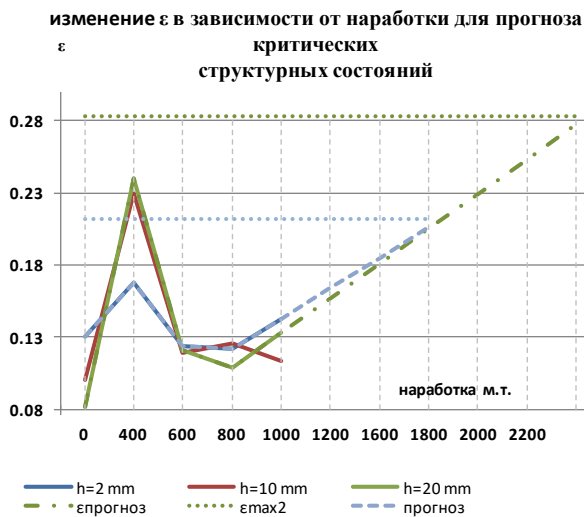


Рис. 6. Прогноз критических структурных состояний рельсовой стали

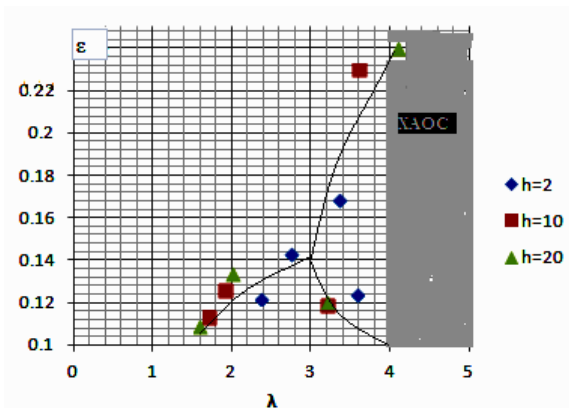


Рис. 7. Результаты работы математической модели: бифуркация структурной неоднородности

## Выводы

При наработке 400 млн т брутто повышению твердости в поверхностном слое соответствует:

- возрастание упорядоченности  $\Delta D$ ;
- снижение энтропии  $D_1$ ;



– нарастание структурной неоднородности  $\varepsilon$ .

Синергические процессы при деградации исходной структуры рельсовой стали выявляются по экстремальным изменениям МФП структуры шлифов.

Данные МФП структур рельсовой стали позволяют выбрать принципы описания эволюции их формирования с целью дальнейшего изучения и выявления способов прогнозирования и управления структурой и, следовательно, эксплуатационными свойствами стали на основе модели мультифрактала.

Работа математической модели, описывающая структурные неоднородности и критические состояния рельсовой стали различных слоев, позволяет прогнозировать ее адаптационные свойства при эксплуатации.

### Список литературы

1. Дифференцированно закаленные рельсы: эволюция структуры и свойств в процессе эксплуатации: монография / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, А. А. Юрьев, К. В. Морозов, С. В. Коновалов. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – 197 с.
2. *Арнольд, А. В.* Теория катастроф, теория хаоса и их приложения // Синергетика и психология. Тексты. Вып. 1. Методологические вопросы / под ред. И. Н. Трофимовой, В. Г. Буданова. – М. : Изд-во МГУ, 1989. – С. 230–251.
3. *Востовский, Г. В.* Мультифрактальный анализ особенностей поверхностей разрушения приповерхностных слоев молибдена / Г. В. Востовский, А. Г. Колмаков, В. Ф. Терентьев // *Металлы*. – 1993. – № 4. – С. 164–177.
4. *Божокин, С. В.* Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
5. *Колмаков, А. Г.* Мультифрактальный анализ рекристаллизованной структуры молибдена / А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин, Д. В. Козицкий // *Металлы*. – 1999. – № 1. – С. 80–87.
6. Методика определения акустических структурных шумов металла / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Байтеряков, А. И. Дедов // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2013. – № 1. – С. 143–149.
7. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. А. Степанов, В. В. Белых, В. Г. Суфиянов // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. – 2009. – № 3. – С. 150–154.
8. *Степанов, В. А.* Автоматизированная система для скрининговой диагностики туберкулеза легких на основе анализа фрактальных объектов : дис. ... канд. техн. наук. – Курск, 2013. – 123 с.
9. *Пригожин, И.* Время, структура и флуктуации // *Успехи физических наук*. – 1980. – Т. 131, № 2. – С. 185–207.
10. *Хакен, Г.* Синергетика. – М. : Мир, 1985. – 423 с.

11. *Николис, Г.* Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1974. – 512 с.

12. *Оксогоев, А. А.* Универсальный алгоритм неравновесной динамики хаотических систем // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2003. – № 5. – С. 3–9.

13. *Вержбицкий, В. М.* Численные методы. Линейная алгебра и нелинейные уравнения. – М. : Высш. шк., 2000. – 266 с.

*V. V. Belykh*, CSc in engineering, associate professor  
E-mail: bil\_ha@mail.ru

*V. V. Murav'ev*, DSc in engineering, professor  
E-mail: pmkk@istu.ru

*V. A. Stepanov*, CSc in engineering, head of laboratory  
E-mail: vladimir1@udm.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Forecasting the Performance Characteristics of Rail Steel on the Basis of Nonlinear Dynamics**

*The relationship between hardness and multifractal image parameters of metal structures of rail steel has been studied at various times of cargo handling in millions of tons. The multifractal parameters of the structure, as well as the mechanical properties of the rail steel, are in a non-linear dependence on the amount of freight carried. On the basis of nonlinear dynamics, a mathematical model (MM) is considered that describes the evolution of the heterogeneity of the metal structure and its critical states at different depths from the contact surface of the rail head, depending on the operating time. Calculations based on MM allow us to evaluate the service life of rail steel.*

**Keywords:** multifractal, rail steel, microstructure, cargo transportation, heterogeneity, mathematical model, forecasting, bifurcation.

УДК 615.47: 616-073

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.

Ю. С. Дудина, аспирант

Н. А. Бабайлов, магистрант

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Способ калибровки метода оценки размеров кавитационного пузырька

*В работе представлены результаты калибровки метода определения размеров кавитационного пузырька, находящегося в состоянии равновесия в воде в акустическом поле исследуемого датчика ультразвукового медицинского диагностического сканера. В результате калибровки метода оценки размеров кавитационного пузырька введена поправка на измеренный диаметр пузырька, равная  $\Delta = -2$  пикс., позволяющая повысить точность оценки.*

**Ключевые слова:** интенсивность ультразвукового излучения, газовый пузырек, кавитация, калибровка.

### Введение

Оценка интенсивности ультразвукового (УЗ) излучения является сложной, но очень актуальной задачей, особенно в области УЗ-диагностики, ввиду того, что на данный момент стандартизированные методы в данной области отсутствуют, при этом на рынке имеется большое количество сканеров, бывших в эксплуатации. С течением времени интенсивность УЗ-излучения может изменяться в результате механических повреждений датчика [1]. Для оценки интенсивности УЗ-излучения разработан новый способ, в основе которого лежит определение радиуса равновесного пузырька, находящегося в равновесии в УЗ-поле датчика сканера, в результате равенства выталкивающей и радиационной сил, действующих на него (патент на полезную модель №140996 от 18.04.2014). Формирование газового пузырька в воде происходит в результате акустической кавитации [2, 3]. Регистрация равновесных газовых пузырьков происходит посредством фотографирования с последующей оценкой размера пузырька в специализированной программной среде [3, 4].

Целью работы является калибровка метода оценки размера пузырька для повышения точности измерения и снижения погрешности определения интенсивности УЗ-излучения.

### Калибровка метода оценки размеров пузырька

Измерение диаметра равновесного пузырька осуществляется путем определения количества пикселей в нем с предварительной оценкой размера одного пикселя. В результате искажения изображения газового пузырька, наличия бликов на изображении, колебания и деформации пузырька величина размера пузырька может отличаться от истинного его значения. Для устранения данной неточности необходимо провести калибровку метода оценки размеров пузырька.

Для калибровки метода оценки размеров пузырьков в качестве эталонного объекта использовался металлический шарик фиксированного размера. Диаметр металлического шарика измерен с помощью двухкоординатного измерительного прибора (ДИП-6) и составил  $d_{\text{ист}} = 651$  мкм. Металлический шарик помещается в емкость с дистиллированной водой с монохромным белым освещением (рис. 1) рядом с линейкой, после чего он регистрируется с помощью фотоаппарата на фокусном расстоянии 90 см с разрешением 36 Мпикс., КМОП – матрицей размером 35,9×24,0 мм, объективом для макросъемки 200mm f/4D и поляризационным фильтром при следующих настройках: ручная фокусировка, выдержка 1/4000 с, чувствительность ISO Hi 1 с подавлением шума для высокого ISO и автоматическим управлением искажениями, режим ручной настройки «баланс белого» или «баланс белого на прямой солнечный свет» [2].

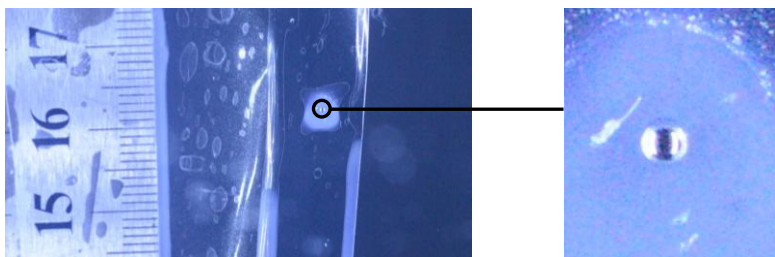


Рис. 1. Регистрируемое изображение металлического шарика

Зарегистрированное изображение металлического шарика загружается в специализированное программное обеспечение, написанное на языке Java. Посредством данной программы определяется размер одного пикселя путем подсчета количества пикселей в одном миллиметре. Для этого строится график распределения серого в диапазоне одного миллиметра от количества пикселей (рис. 2), отсюда размер одного пикселя  $l_{\text{pix}}$ , мкм:

$$l_{\text{pix}} = \frac{10^{-3}}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество пикселей в 1 мм.

Из графика на рис. 2 видно, что в 1 мм размещается  $N = 81$  пикс., следовательно, размер одного пикселя  $l_{\text{pix}} = 12,3$  мкм.

После определения размера одного пикселя производится подсчет количества пикселей  $N_d$  в диаметре металлического шарика  $d_{\text{изм}}$ . Для этого строится график распределения серого в диапазоне диаметра металлического шарика  $d_{\text{изм}}$  от количества пикселей в нем (рис. 3). Диаметр металлического шарика  $d_{\text{изм}}$  определяется по формуле

$$d_{\text{изм}} = N_d \cdot l_{\text{pix}}, \quad (2)$$

где  $N_d$  – количество пикселей в диаметре металлического шарика  $d$ .

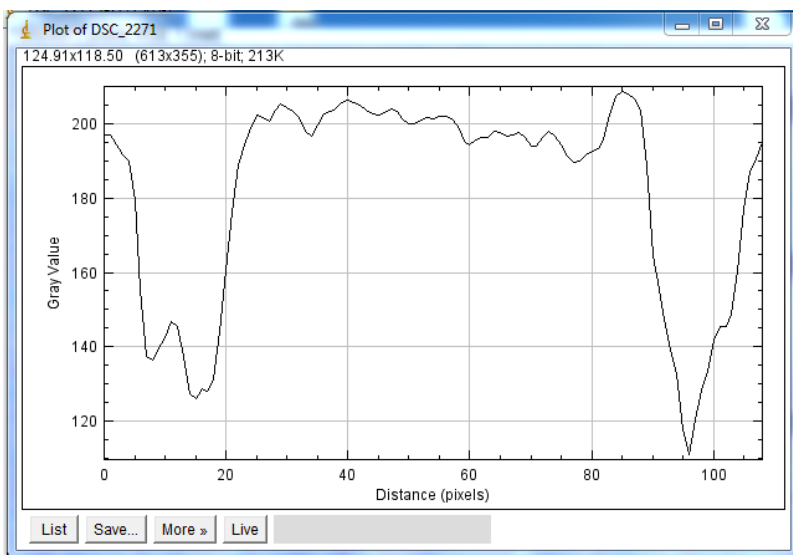


Рис. 2. Количество пикселей в одном миллиметре

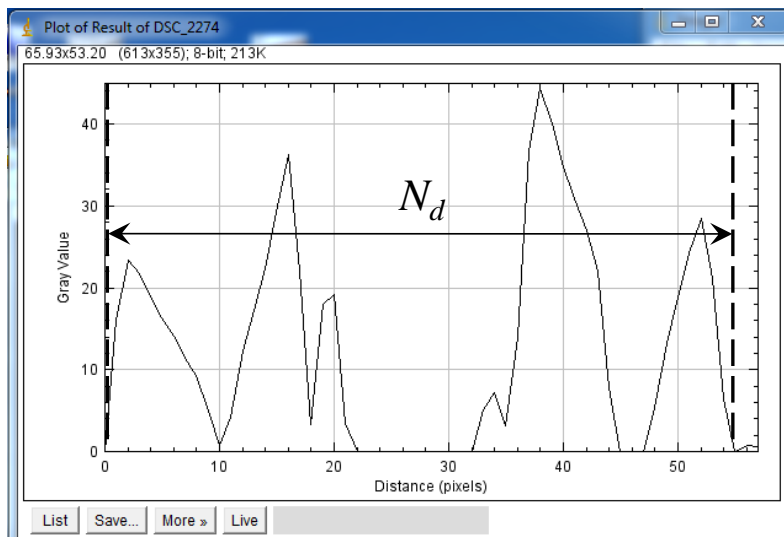


Рис. 3. Количество пикселей в диаметре шарика

По графику на рис. 3 видно, что в диаметре шарика находится  $N_d = 55$  пикс., учитывая, что размер одного пикселя  $l_{\text{pix}} = 12,3$  мкм, то средний диаметр металлического шарика  $d_{\text{изм}} = 677$  мкм.

Сравнивая значения диаметра металлического шарика  $d_{\text{изм}}$  и его истинного диаметра  $d_{\text{ист}}$ , получим отклонение измеренного размера на  $\Delta d = 26$  мкм, что составляет 2 пикс. Размер пикселя зависит от фокусного расстояния фотоаппарата и возрастает с его увеличением, ввиду чего данное отклонение может носить существенную погрешность. Аналогичные эксперименты проведены для других фокусных расстояний, при этом отклонение измеренного диаметра металлического шарика  $d_{\text{изм}}$  от его истинного диаметра  $d_{\text{ист}}$  остается равным 2 пикс.

Следовательно, при оценке размера газового пузырька  $d$  с использованием программы необходимо ввести поправку  $\Delta$ :

$$d = (N_d + \Delta) \cdot l_{\text{pix}}, \quad (3)$$

где  $\Delta = -2$  пикс.

## Выводы

Таким образом, для повышения достоверности измерения размера газового пузырька, находящегося в равновесии в УЗ-поле датчика, не-

обходимо нивелировать разницу между истинным и измеренным значением с помощью введенной поправки  $\Delta = -2$  пикс. при оценке количества пикселей в диапазоне диаметра пузырька.

### Список литературы

1. Хилл, К. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. – М. : Физматлит, 2008. – 544 с.
2. Экспериментальная оценка интенсивности ультразвукового излучения медицинского оборудования на основе анализа размеров равновесных газовых пузырьков в жидкости / О. В. Муравьева, О. П. Богдан, Д. В. Злобин, В. Н. Милич, С. И. Масленников, Ю. С. Дудина // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 1. – С. 136–141.
3. Пат. 140996 РФ на полезную модель : МПК G01H 3/00 (2006.01). Устройство для определения параметров ультразвукового преобразователя / Муравьева О. В., Богдан О. П., Милич В. Н., Масленников С. И. – № 2014101525/28 ; заявл. 17.01.14 ; опубл. 27.05.14, Бюл. № 15.
4. Обработка изображений, формируемых при взаимодействии ультразвука с неоднородной средой / С. И. Масленников, В. Н. Милич, О. П. Богдан, О. В. Муравьева // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «КоМУ-2013» : сб. тез. докл. – Ижевск : ФТИ УрО РАН, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 57–58.

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*Yu. S. Dudina*, magister student

*N. A. Babaylov*, postgraduate student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Method for Calibrating the Method for Estimating the Dimensions of a Cavitation Bubble

*The results of calibration of the cavity bubble size-level determinations in the state of equilibrium in water in the acoustic field of the ultrasound medical diagnostic scanner method are presented. As a result, calibration of the method for measuring the size of the cavitation bubble introduces a correction for the measured bubble diameter equal to  $\Delta = -2$  pixels, which makes it possible to increase the accuracy of the estimates.*

**Keywords:** intensity of ultrasonic radiation, gas bubble-rivers, cavitation, calibration.

УДК 615.47: 616-073

*О. П. Богдан*, канд. техн. наук, доц.

*А. Д. Широбокова*, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование влияния различных факторов на погрешность измерения интенсивности ультразвукового излучения**

В статье показано влияние фокусного расстояния на величину погрешности измерения интенсивности ультразвукового излучения. Выполнена оценка случайной погрешности измерения интенсивности ультразвукового излучения, обусловленной колебаниями газового пузырька, находящегося в состоянии равновесия в ультразвуковом поле датчика медицинского сканера. Даны рекомендации по минимизации погрешности измерения интенсивности ультразвукового излучения.

**Ключевые слова:** газовый пузырек, интенсивность ультразвукового излучения, погрешность измерения, достоверность.

### **Введение**

Интенсивность ультразвукового (УЗ) излучения является основным параметром, влияющим на безопасность диагностического исследования. Несмотря на то, что международные стандарты строго регламентируют ограничение интенсивности диагностического УЗ-излучения, эта величина может превышать допустимые значения, вследствие чего необходимо периодически проверять ее. В настоящее время существует четыре основных метода оценки интенсивности: метод измерения радиационного давления (погрешность 20 %), интерферометрический метод (погрешность 5 %), калориметрический метод (рекомендован ИЕС 782, погрешность 25 %), метод взаимности (погрешность 25 %) [1–5]. Данные методы применимы лишь для непрерывного УЗ-излучения терапевтического диапазона, к тому же большинство из них имеют очень большую погрешность измерения.

В связи с этим разработка новых методов оценки интенсивности УЗ излучения, позволяющих проводить измерения с меньшими погрешностями, является актуальной задачей.

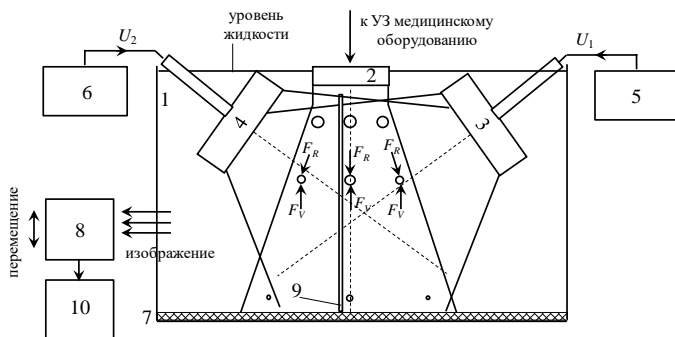
Целью работы является оценка погрешности методики измерения интенсивности УЗ-излучения диагностических сканеров, в основе кото-



рого лежит измерение радиуса газового пузырька, находящегося в УЗ-поле в состоянии равновесия.

### Методика измерения интенсивности УЗ-излучения диагностических сканеров

Методика оценки интенсивности УЗ-излучения основана на формировании в воде кавитационных пузырьков, на которые действуют разнонаправленные выталкивающая и радиационная силы, при равенстве которых наступает состояние равновесия пузырьков [5]. Методика реализуется устройством, блок-схема которого представлена на рисунке. Емкость *1* заполнена дистиллированной водой температурой 30–40 °С, на дне которой расположен поглотитель *7*. При помощи двух формирователей пузырьков, состоящих из высокочастотного (880 кГц) пьезодатчика *3*, подключенного к генератору синусоидальных сигналов *5* и низкочастотного (40 кГц) пьезодатчика *4*, подключенного к высоковольтному генератору *6*, создается стабильная кавитация в воде. После выключения датчиков формирователей пузырьков, в поле исследуемого УЗ-излучателя *2* остаются только равновесные газовые пузырьки, которые регистрируются с помощью фотоаппарата *8*, полученные изображения поступают на персональный компьютер *10* [5, 6] и обрабатываются в специализированном программном обеспечении с целью оценки размера пузырька [7].



Устройство оценки интенсивности УЗ-излучения: *1* – емкость с жидкостью, *2* – исследуемый УЗ-излучатель, *3* – датчик формирователя пузырьков высокочастотный, *4* – датчик формирователя пузырьков низкочастотный, *5* – генератор синусоидальных сигналов, *6* – высоковольтный генератор, *7* – поглотитель, *8* – прибор для фотосъемки, *9* – линейка, *10* – персональный компьютер со специализированным программным обеспечением

Интенсивность УЗ-излучения определяется по формуле [6]

$$I = \frac{\left[ C_0 \left[ (kr)^2 + \left[ \left( 3 \frac{\mu^2}{\delta} \right) - (kr)^2 \right]^2 \right] \left[ 1,33\pi r^3 (\rho_0 - \rho) g \right] \right]}{4\pi r^2 (kr)^4} \quad (1)$$

где  $\delta = \rho_0/\rho$ ;  $k$  – волновое число;  $\mu = C/C_0$ ;  $C$  – скорость звука в газовом пузырьке;  $C_0$  – скорость звука в жидкости;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $r$  – радиус пузырька;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $\rho$  – плотность газового пузырька.

В процессе измерения интенсивности могут возникать погрешности, которые обусловлены двумя основными причинами, такими как влияние колебаний газового пузырька, находящегося в УЗ-поле, и влияние фокусного расстояния.

### Результаты и обсуждение

Для определения погрешности измерения интенсивности УЗ-излучения использовался конвексный датчик УЗ-сканера EDAN U50 с рабочей частотой 2,5 МГц.

**Таблица 1. Экспериментальное определение погрешности размера газового пузырька, обусловленного его колебаниями (фокусное расстояние 150 см)**

№ фотографии	1 пузырек			2 пузырек			3 пузырек		
	$h$ , мм	$R$ , пикс.	$R$ , мкм	$h$ , мм	$R$ , пикс.	$R$ , мкм	$h$ , мм	$R$ , пикс.	$R$ , мкм
1	20	6	81	25	7	95	46	6	81
2	21	7	95	25	7	95	46	6	81
3	20	7	95	25	7	95	47	6	81
4	20	7	95	26	6	81	46	7	95
5	20	6	81	25	6	81	46	7	95
Радиус пузырька $R_{\text{cp}} \pm X_{\text{сл}}$ , пикс.	7 ± 1			7 ± 1			6 ± 1		
Радиус пузырька $R_{\text{cp}} \pm X_{\text{сл}}$ , мкм	89 ± 9			89 ± 9			86 ± 9		
Интенсивность УЗ-излучения, $I_{\text{cp}} \pm \Delta I_{\text{сл}}$ , мВт/см <sup>2</sup>	82 ± 16			81 ± 16			78 ± 15		
$\delta I_{\text{сл}}$ , %	20			20			18		

Оценка влияния колебаний пузырька на погрешность оценки его размера проводилась по пяти фотографиям, на которых зарегистрирован

один и тот же пузырек в разные моменты времени с интервалом 10 с, результаты занесены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что погрешность измерения радиуса пузырька составляет  $X_{\text{сл}} = \pm 1$  пикс. и будет меняться в зависимости от размера пикселя, при этом в пикселях погрешность остается постоянной вне зависимости от других факторов, приводящих к изменению его размера. Для конвексного датчика с рабочей частотой 2,5 МГц погрешность измерения интенсивности излучения, обусловленная влиянием колебаний газовых пузырьков, составляет 18–20 %, что ниже, чем погрешности существующих методов.

Уменьшить погрешность измерения, обусловленную колебанием пузырьков, можно, снижая размер пикселя при регистрации изображения, этого можно добиться, варьируя фокусное расстояние при съемке.

Для оценки влияния фокусного расстояния на погрешность измерения выполнена серия экспериментов (табл. 2). При этом на каждом фокусном расстоянии, которое изменялось в диапазоне 60–100 см, фиксировалось несколько изображений газовых пузырьков в состоянии равновесия и проводилась оценка их радиусов на глубине 50 мм. Как видно из табл. 2, с увеличением фокусного расстояния увеличивается размер одного пикселя и, следовательно, сама погрешность измерения. При этом рост погрешности измерения происходит быстрее, чем увеличивается фокусное расстояние. Так, при увеличении фокусного расстояния в 1,5 раза погрешность измерения увеличилась в 2 раза.

**Таблица 2. Влияние фокусного расстояния на величину погрешности измерения**

Фокусное расстояние, см	Размер 1 пикселя, мкм	Радиус пузырька $R_{\text{ср}} \pm X_{\text{сл}}$ , мкм	Интенсивность УЗ-излучения $I_{\text{ср}} \pm \Delta I_{\text{сл}}$ , мВт/см <sup>2</sup>	Относительная погрешность $\delta I_{\text{сл}}$ , %
60	14	69,6 ± 4,8	53 ± 1	1,9
70	16	91,8 ± 8,2	87 ± 2	2,15
80	19	94,8 ± 11,4	93 ± 3	3
90	21	67,0 ± 6,7	49 ± 2	3,1
100	25	92,8 ± 14,8	88 ± 3	3,5

Стоит отметить, что погрешность измерения интенсивности УЗ-излучения будет оказывать незначительное влияние на результат при проверке ультразвуковых медицинских приборов, работающих на больших интенсивностях, например терапевтические аппараты или УЗ-сканеры с доплеровским картированием. Однако при проверке медицинских УЗ-приборов, излучающих низкий уровень интенсивности,

погрешность измерения будет оказывать больший вклад в результат измерения.

### **Заключение**

Таким образом, в работе исследованы влияние колебаний газового пузырька и фокусного расстояния на величину погрешности измерения интенсивности УЗ-излучения. Показана зависимость величины погрешности от размера пикселя, который изменяется при изменении фокусного расстояния. Для минимизации погрешности измерения интенсивности УЗ-излучения необходимо выбирать минимально возможное фокусное расстояние исходя из условия обеспечения необходимой точности измерения и возможностей фотоаппаратуры.

### **Список литературы**

1. Standard means for the reporting of the acoustic output of medical diagnostic ultra-sonic equipment: IEC 61157(2007). 16.08.2007. – IEC Publication 61157, 2007. – 36 p.
2. Guide for measuring and reporting acoustic output of diagnostic ultrasound medi-cal devices: FDA 510(k). Rockville, MD: Center for Devices and Radiological Health, US FDA, 1999.
3. Guide for measuring and reporting acoustic output of diagnostic ultrasound medi-cal devices: FDA 510(k). Rockville, MD: Center for Devices and Radiological Health, US FDA, 1999.
4. Report on acoustical measurements conducted for: IEC60601-2-37. – Japan, Токуо, Sensortechnos, Inc., 2002. – 28 p.
5. Хилл, К. Ультразвук в медицине. Физические основы применения. – М. : Физматлит, 2008. – 544 с.
6. Повышение достоверности оценки интенсивности ультразвукового излучения медицинского диагностического оборудования / О. П. Богдан, Ю. С. Дудина, Н. А. Бабайлов, А. Д. Широкова // Электронный сб. материалов XXV Республ. выставки-сессии студ. проектов «Выставка инноваций – 2018 (весенняя сессия)». – В печати.
7. Обработка изображений формируемых при взаимодействии ультразвука с неоднородной средой / С. И. Масленников, В. Н. Милич, О. П. Богдан, О. В. Муравьева // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых «КоМУ-2013» : сб. тез. докл. – Ижевск : ФТИ УрО РАН, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2013. – С. 57–58.

---

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*A. D. Shirobokova*, student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Research of the Influence of Various Factors on the Faults in Measuring the Intensity of Ultrasonic Radiation**

*The article shows the influence of the focal distance on error term in measuring the intensity of ultrasonic radiation. The random error in measuring the intensity of ultrasonic radiation due to oscillations of a gas bubble in an equilibrium state in the ultrasound field of a medical scanner sensor was evaluated. Recommendations are given about minimizing the error in measuring the intensity of ultrasonic radiation.*

**Keywords:** gas bubble, intensity of ultrasonic radiation, measurement error, reliability.

УДК 621.78(04)

*А. Л. Джауль*, магистрант

E-mail: foulter@yandex.ru

*И. В. Штенников*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: igorst58@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Тепловой эффект перлитных превращений при вакуумном хромировании**

*Определена величина теплового эффекта перлитных превращений, для стали марки 50РА, в условиях нанесения покрытия на внутреннюю поверхность стальной детали, методом термического испарения в вакууме с соосно расположенного резистивного испарителя.*

**Ключевые слова:** фазовые превращения, эндотермические реакции, тепловой эффект, математическое моделирование, вакуумное хромирование.

### **Введение**

Известно, что при температурах фазовых превращений в стали протекают эндотермические реакции, поглощающие поступающее тепло. По результатам различных исследований, величина теплового эффекта перлитных превращений колеблется в широких пределах [1].

В табл. 1 приведены значения величины теплового эффекта перлитного превращения, полученные различными исследователями [1].

*Таблица 1. Тепловой эффект перлитных превращений для стали марки У8*

Тепловой эффект, Дж/г	Метод определения
63,2	Из кривой теплосодержания при охлаждении в ледяном калориметре
67,8	Из кривой теплосодержания при охлаждении в водяном калориметре
89,3	Из кривой теплосодержания при охлаждении в блоке металлического калориметра
99,0	Методом построения кривой теплоемкости

По мнению И. Н. Кидина [1], два последних значения получены в условиях, наиболее близких к равновесным, и считаются наиболее достоверными. Поэтому для расчетов влияния эндотермических реакций на температурное состояние детали в области фазовых превращений целесообразно принимать величину теплового эффекта 99,0 Дж/г.

В процессе вакуумного хромирования внутренней поверхности полый детали методом термического испарения с соосно расположенного резистивного испарителя деталь может разогреться до температуры фазовых превращений [2].

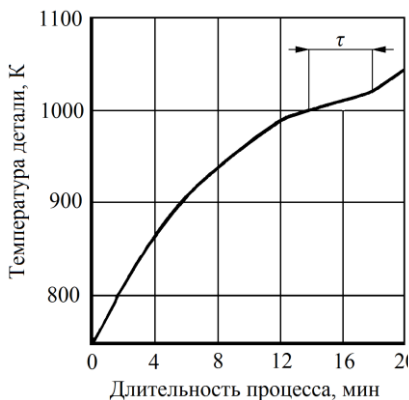


Рис. 1 Температура детали в процессе осаждения хромового покрытия ( $T_{\text{конд},0}=750\text{ К}$ )

На рис. 1 приведены результаты исследований температуры детали в процессе нанесения покрытия. Хромированию подвергались втулки из отожженной стали марки 50РА: длиной 80 мм, наружным диаметром 30 мм и диаметром отверстия 10 мм при температуре испарителя 1670 К, начальной температуре конденсации ( $T_{\text{конд},0}$ ) 750 К, длительности нанесения покрытия 20 мин и давлении остаточных газов в камере не более  $5 \cdot 10^{-3}$  Па [3].

При достижении температуры 1000 К наблюдается участок замедления нагрева детали, обусловленный протеканием эндо-

термических реакций [4]. Целью данной работы является определение влияния фазовых превращений на температуру стальной детали в процессе вакуумного хромирования методом термического испарения с соосно расположенного резистивного испарителя.

### Моделирование теплового состояния детали

Для цилиндрической детали плотность теплового потока фазовых превращений определяется по формуле

$$q_{\text{фаз}} = \frac{g\rho V}{S_1 \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность стали;  $V$  – объем покрываемой детали;  $S_1$  – площадь внутренней поверхности детали;  $\tau$  – время протекания эндотермической реакции.

Время протекания эндотермических реакций ( $\tau$ ) принимаем равным 4 мин в соответствии с данными, приведенными на рис. 1.

Таким образом, зная величину теплового эффекта перлитного превращения, можно оценить влияние фазовых превращений на температуру детали. Однако поскольку величина теплового эффекта довольно

сильно различия, произведем расчет для каждого значения, представленного в табл. 1. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

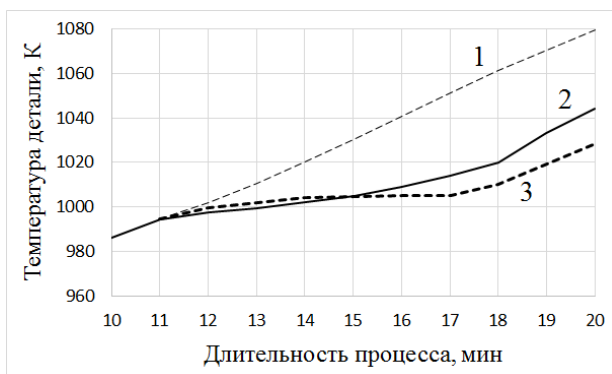
**Таблица 2. Плотность теплового потока фазовых превращений**

Тепловой эффект, Дж/г	Тепловой поток фазовых превращений, кВт/м <sup>2</sup>
50,0*	32,2
63,2	41,1
67,8	44,2
89,3	58,3
99	64,4

\*Величина теплового эффекта в 50 Дж/г приведена для стали марки 40.

Для процесса вакуумного хромирования внутренней поверхности стальных деталей с соосно расположенного резистивного испарителя разработана математическая модель температурного состояния детали и программа расчета изменения ее температуры в зависимости от режимов и условий нанесения покрытий [2].

На ее основе проведено моделирование температурного состояния детали для значений теплового потока фазовых превращений, приведенных в табл. 2. На рис. 2 представлены результаты моделирования температуры детали: 1 – без учета фазовых превращений; 3 – с учетом фазовых превращений для  $q_{\text{фаз}} \geq 32 \text{ кВт/м}^2$ . Кривая 2 – результаты экспериментальных исследований температуры детали в процессе вакуумного хромирования.



**Рис. 2.** Результаты моделирования: 1 – моделирование без учета фазовых превращений; 2 – экспериментальные исследования температуры детали в процессе хромирования; 3 – моделирование с учетом фазовых превращений ( $q_{\text{фаз}} \geq 32 \text{ кВт/м}^2$ ).



Из рис. 2 видно, что даже при минимальном значении теплового потока  $32 \text{ кВт/м}^2$  фазовые превращения полностью поглощают поступающее тепло и дальнейший нагрев детали прекращается. Однако, в отличие от экспериментальной кривой, которая имеет некоторый угол наклона, кривая нагрева 3 находится (колеблется) на уровне  $1000 \text{ К}$  на протяжении всего времени протекания эндотермической реакции.

Моделирование процесса хромирования при меньших значениях  $q_{\text{фаз}}$ , результаты которых представлены на рис. 3, показало, что полученные значения теплового потока фазовых превращений (табл. 2) чрезмерно большие. Так, при значении  $q_{\text{фаз}} = 20 \text{ кВт/м}^2$  кривая нагрева практически совпадает с экспериментальной кривой. Дальнейшее увеличение  $q_{\text{фаз}}$  приводит к росту отклонения теоретических значений температуры детали от экспериментальных.

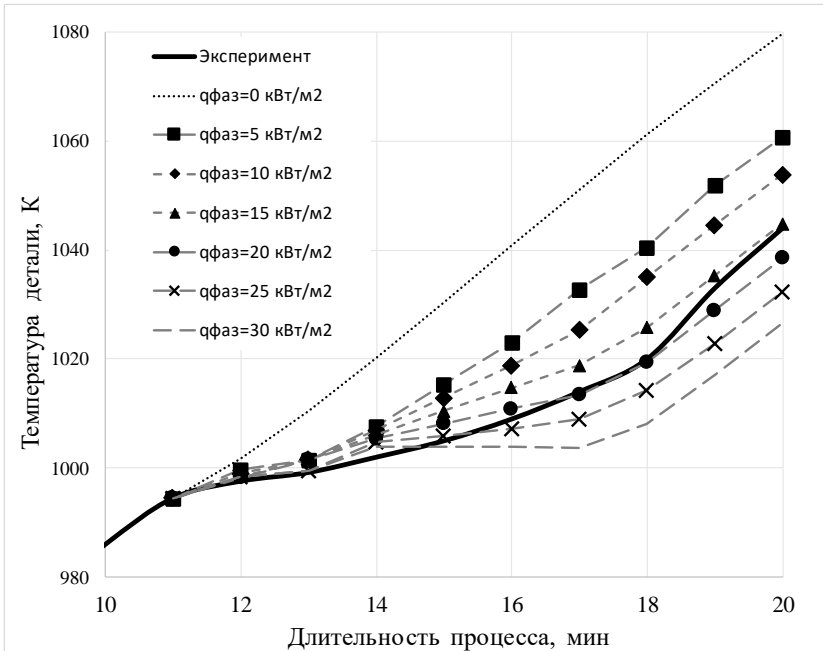


Рис. 3 Сравнительные результаты моделирования

### Тепловой эффект перлитных превращений детали

Высокое значение плотности теплового потока фазовых превращений может быть связано с высоким значением теплового эффекта пер-

литных превращений. По полученным данным моделирования, достаточное значение плотности теплового потока фазовых превращений составляет порядка  $17,5 \text{ кДж/м}^2$ . Таким образом, можно определить величину теплового эффекта перлитных превращений в стали 50РА в процессе вакуумного хромирования, выразив его из формулы (1):

$$g = q_{\text{фаз}} \frac{S_1 \tau}{V\rho} = 17,5 \cdot 10^3 \frac{2,513 \cdot 10^{-3} \cdot 240}{5,027 \cdot 10^{-5} \cdot 7810 \cdot 10^3} = 26,9 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}.$$

Полученное значение теплового эффекта почти в два раза меньше минимального значения, приведенного в табл. 2 [1].

Значения теплового эффекта в табл. 1 приведены для стали У8, тогда как для стали любого доэвтектоидного состава на превращение требуется меньшее количество тепла. Например, для среднеуглеродистой стали марки 40, согласно данным Кидина [5], тепловой эффект превращения в два раза меньше, чем для стали У8. К тому же в состав стали 50РА входит легирующая добавка бора, увеличивающая прокаливаемость стали, т. е. глубину закалки. Благодаря этому содержание перлита в толщине детали уменьшается, и величина теплового эффекта перлитного превращения снижается.

## Выводы

Учитывая различие теплового эффекта перлитных превращений и его зависимость от множества факторов, необходимо проводить экспериментальные исследования с целью определения величины теплового эффекта для конкретной марки стали в условиях нанесения покрытия на внутреннюю поверхность стальной детали методом термического испарения с соосно расположенного резистивного испарителя.

## Список литературы

1. *Кидин, И. Н.* Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали. – М. : Металлургия, 1957. – 93 с.
2. *Джауль, А. Л.* Математическая модель температурного состояния стальной детали при температурах фазовых превращений в стали / А. Л. Джауль, И. В. Штенников // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – В 4 т. Т. 1. – Губкин ; Старый Оскол : Ассистент плюс, 2018. – С. 133–137.
3. *Сидоренко, В. И.* Математическая модель теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей / В. И. Сидоренко, И. В. Штенников // Интеллектуальные системы в производстве, 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 71–76.

4. Сидоренко, В. И. Тепловое состояние поверхности конденсации при нанесении металлических покрытий / В. И. Сидоренко, К. П. Фефилов // Вестник ИжГТУ, 2000. – № 1. – С. 21–22.

5. Кидин, И. Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. – М. : Metallurgia, 1969. – 375 с.

A. L. Jaule, magister student

E-mail: foulter@yandex.ru

I. V. Shtennikov, CSc in engineering, associate professor,

head of “Electrical Engineering department”

E-mail: igorst58@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Thermal Effect of Perlitic Transformations in Steel in Vacuum Chrome Plating Process**

*Thermal effect value of perlitic transformations is determinated for steel grade 50RA, during coating deposition process on the inner surface of a steel bushing by the thermal vaporization method from a coaxially located resistive evaporator.*

**Keywords:** phase transformations, endotermic reactions, thermal effect, mathematical modeling, vacuum chrome plating.

УДК 534.641

*Д. В. Злобин*, канд. техн. наук, доц.

*О. П. Богдан*, канд. техн. наук, доц.

*В. В. Волков*, магистрант

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Экспериментальные исследования акустического импеданса вязкоупругих сред**

*В работе представлены результаты измерения акустического импеданса вязкоупругих сред (глицерин, печень, молоко), выполнена оценка влияния температуры среды и содержания жировых компонентов в среде на величину акустического импеданса.*

**Ключевые слова:** амплитудно-частотная характеристика, акустический импеданс, схема замещения, продольная пьезопластина, сдвиговая пьезопластина, биологическая среда.

### **Введение**

Исследование акустических свойств вязкоупругих сред позволяет оценивать их качество, что очень важно во многих областях промышленности, где требуется измерять характеристики различных жидкостей, в том числе и изменяющихся с течением времени в процессе наработки или под действием внешних факторов (жидкие клеи, герметики, масло, нефтепродукты, химические растворы и т. д.), с целью оценки их качества. На оценке характеристик биологических тканей основаны методы медицинской диагностики, для реализации которой необходимо знание истинных значений свойств здоровых тканей и тканей с патологическими изменениями. В настоящее время известно множество физических методов, позволяющих получать информацию об акустических свойствах сред, в том числе и биологических [1–3]. Несмотря на это, разработка новых и усовершенствование уже известных методов является важной и актуальной задачей. В частности, в области медицины не все известные методы исследования акустических свойств можно применять по причине того, что биологические ткани организма, например мягкие ткани, кровь или образцы внутренних органов, как правило, могут быть использованы в небольшом объеме. Кроме этого, точность измерений скорости и поглощения ультразвука, плотности, акустического

импеданса должна быть высокой для достоверности получения конечных результатов.

### Установка для измерения акустического импеданса

Методика для измерения продольного и сдвигового акустических импедансов вязкоупругих сред реализована на исследовании амплитудно-частотных и электрических характеристик пьезопластин, поляризованных в определенном направлении (продольная и сдвиговая поляризации), которые погружаются в исследуемую среду, эталонную среду и воздух (для учета внутренних потерь в пьезопластине) [4]. Колеблющийся пьезоэлемент возможно заменить эквивалентной электрической схемой замещения, которая состоит из электрической емкости  $C_1$ , соединенной параллельно с цепочкой последовательно соединенных индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и активного сопротивления  $R = R_V + R_I$ , рассмотренной в [4].

Блок-схема измерительной установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды показана на рис. 1. К генератору через сопротивление развязки  $R_p$  подключается пьезопластина, которая работает на продольном пьезоэффекте (пьезомодуль  $d_{33}$ ) либо сдвиговом пьезоэффекте (пьезомодуль  $d_{15}$ ). Тип поляризации пьезопластины определяет возможность измерения сдвигового или продольного акустического импеданса среды. При этом выходной сигнал с пьезопластины усиливается с помощью усилителя, и измеряется с использованием осциллографа ее амплитудно-частотная характеристика.

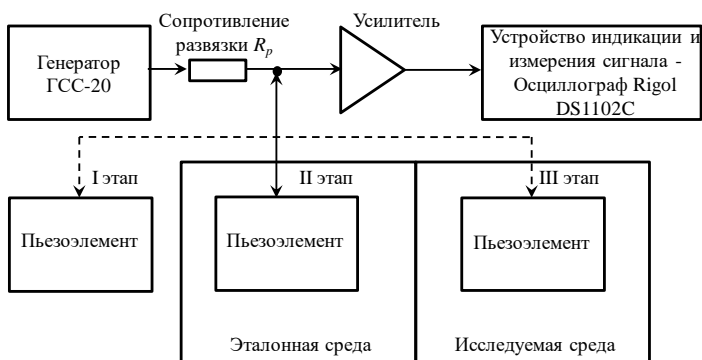


Рис. 1. Блок-схема установки для экспериментальной оценки акустического импеданса среды

Акустический импеданс  $Z$  определяется по формуле [4]:

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C_0}^2 Z_0 f_{r_0}^2 R_{I_0}}{U_{R_{0I}}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \quad (1)$$

где  $U_C$  и  $U_{C_0}$  – напряжение на конденсаторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду соответственно [4],

$$U_C = \frac{U_r}{(R_V + R_I) \omega C}, \quad (2)$$

где  $U_{R_I}$  и  $U_{R_{0I}}$  – напряжение на резисторе  $R_I = R - R_V$  и  $R_{I_0} = R_0 - R_V$  [5],

$$U_{R_I} = \frac{U_r R_I}{R_V + R_I} \quad (3)$$

$R$  и  $R_0$ ,  $R_V$  – модуль импеданса при нагрузке пьезопластины на исследуемую среду, эталонную среду и воздух.

Напряжение, снимаемое во время резонанса с обкладок пьезопластины, невелико, поэтому для повышения достоверности и точности измерений можно использовать какой-либо усилитель для усиления выходного сигнала. Электрическая принципиальная схема двухкаскадного усилителя с коэффициентом усиления 11 представлена на рис. 2.

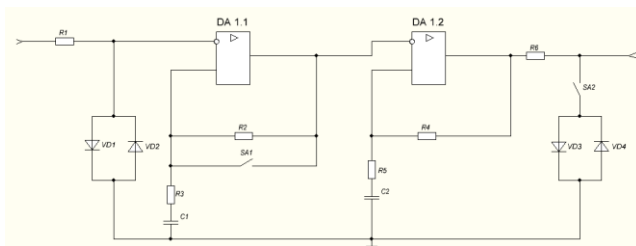


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема усилителя

Наибольшая амплитуда с выхода усилителя не может превышать рабочее напряжение операционного усилителя, составляющее  $\pm 5$  В, что ограничивает подаваемое напряжение с генератора на усилитель, которое не должно превышать 500 мВ при коэффициенте усиления 11.

## Результаты и обсуждение

Проведены измерения амплитудно-частотных характеристик с целью определения акустического импеданса сред – глицерин, молоко жирностью 3,22–4,2 % и 0,5%, печень свиная – при следующих параметрах измерительной установки: продольная пьезопластина размером  $20 \times 20 \times 1$  мм (емкость  $C_1 = 4,7$  нФ, напряжение генератора  $U_g = 400$  мВ, эталонная среда – вода ( $Z_0 = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м)), сдвиговая пьезопластина размером  $9,7 \times 6,3 \times 1$  мм (емкость  $C_1 = 0,87$  нФ, напряжение генератора  $U_g = 300$  мВ, эталонная среда – эпоксидный клей ( $Z_0 = 1,59 \cdot 10^6$  Па·с/м)), сопротивление развязки 300 Ом, коэффициент усиления  $k = 11$ .

Результаты измерения амплитудно-частотных характеристик и электрических параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины в воздухе и эталонных средах представлены в табл. 1 и используются для расчета акустических импедансов исследуемых сред по формулам (1)–(3).

**Таблица 1. Электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на воздух и эталонные среды**

Среда	$f_s$ , МГц	$f_{zs}$ , МГц	$U_r$ , В	$U_a$ , В	$R$ , Ом	$C$ , нФ	$L$ , мкГн
Продольная пьезопластина ( $20 \times 20 \times 1$ мм)							
Воздух	2,027	2,221	0,002	0,229	2,077	0,942	6,540
Вода	1,987	2,215	0,011	0,078	8,190	1,167	5,498
Сдвиговая пьезопластина ( $9,7 \times 6,3 \times 1$ мм)							
Воздух	0,919	1,050	0,560	8,400	20,763	0,274	10,940
Эпоксидный клей	0,880	1,180	2,640	6,400	104,781	0,716	45,640

Амплитудно-частотные характеристики для продольной пьезопластины, нагруженной на глицерин и молоко различной жирности, представлены на рис. 3.

Из рис. 3, б видно, что с увеличением жирности молока наблюдается увеличение напряжения  $U_a$ , в то время как напряжение  $U_r$  практически не меняется, при этом наблюдается изменение параметров электрической схемы замещения пьезопластины (табл. 2).

Аналогичные исследования выполнены для продольной и сдвиговой пьезопластин, нагруженных на печень свиную (рис. 4, табл. 2).

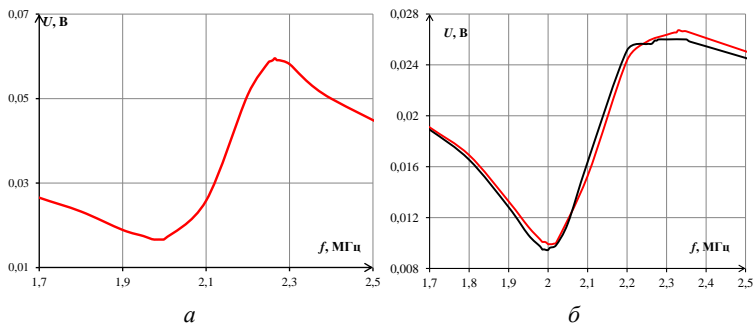


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика продольной пьезопластины, нагруженной на глицерин (а), нагруженной на молоко (б): — 3,2–4,2 % жирности, — 0,5 % жирности

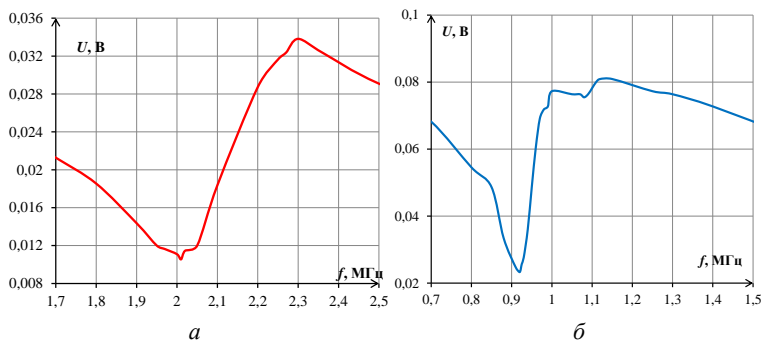


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики продольной (а) и сдвиговой (б) пьезопластин, нагруженных на печень свинную

Таблица 2. Параметры электрических характеристик пьезопластины, нагруженной на вязкоупругие среды

Изменяемый параметр	$f_r$ , МГц	$f_a$ , МГц	$U_r$ , В	$U_a$ , В	$R$ , Ом	$C$ , нФ	$L$ , мкГн
	Глицерин						
	1,995	2,265	0,017	0,060	13,077	1,450	4,555
Температура	Печень (продольная пьезопластина)						
23 °С	2,010	2,300	0,28	0,011	7,399	1,454	4,312
Температура	Печень (сдвиговая пьезопластина)						
20 °С	0,920	1,120	0,023	0,081	3,451	0,432	69,140
Жирность	Молоко						
0,5 %	1,94	2,22	0,26	0,7	5,91	1,46	4,63
3,2–4,2 %	1,94	2,22	0,25	0,71	5,77	1,46	4,63



Основываясь на полученных данных, с помощью формул (1)–(3) определены значения акустических сопротивлений для глицерина, молока различной жирности, печени свиной (табл. 3).

Из табл. 3 видно, что с увеличением жирности молока акустический продольный импеданс уменьшается. Учитывая, что акустический импеданс равен

$$Z = \rho C, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $C$  – скорость ультразвуковой волны в среде, данное явление объясняется изменением плотности молока при изменении количества молочного жира и скорости звука в нем. Плотность молочного жира ( $\rho = 924 \text{ кг/м}^3$ ) [5] меньше плотности обезжиренного молока ( $\rho = 1030 \text{ кг/м}^3$ ) [5], следовательно, с увеличением жирности плотность молока уменьшается, что ведет к уменьшению акустического импеданса.

В табл. 3 также приведены экспериментальные (при температуре 23 °С) и справочные (при температуре 37 °С) значения акустического продольного импеданса печени свиной. Учитывая, что при увеличении температуры среды наблюдается уменьшение акустического импеданса, можно считать, что экспериментально полученное значение акустического импеданса подтверждает правильность измерений. Также получено значение сдвигового акустического импеданса печени свиной, что подтверждает наличие сдвиговой ультразвуковой волны в ней и при достаточном наборе статистических данных может быть использовано для повышения достоверности постановки диагноза при проведении эластографических исследований [6].

**Таблица 3. Акустический импеданс вязкоупругих сред**

Изменяемый параметр	Акустический импеданс $Z$ , $10^6 \text{ Па}\cdot\text{с/м}$
Продольный акустический импеданс	
	Глицерин
Эксперимент	3,09
Справочный	2,48
	Молоко
Жирность	
0,5 %	1,95
3,2–4,2 %	1,67
	Печень
Температура	
23 °С	2,11
37 °С (справочное)	1,63
Сдвиговый акустический импеданс	
	Печень
Температура	
20 °С	0,018

Различие справочного и экспериментального акустических импедансов глицерина (табл. 3) может наблюдаться в результате наличия различных примесей в глицерине, используемом при проведении эксперимента.

### **Заключение**

Таким образом, в работе выполнен анализ акустических характеристик вязкоупругих сред, основываясь на измерении амплитудно-частотной характеристики пьезопластины, нагруженной на среды, с использованием метода электроакустических аналогий путем преобразования всех элементов механической системы в электрические. Показано влияние количества жировых составляющих биологической среды на электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на эти среды, и на ее акустический импеданс. Полученные значения акустических импедансов исследованных сред удовлетворительно согласуются с их справочными данными и не противоречат законам физики.

### **Список литературы**

1. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. – М. : Изд-во иностр. лит., 1957. – 726 с.
2. *Чуприн, В. А.* Контроль жидких сред с применением ультразвуковых нормальных волн. – М. : Спектр, 2015. – 218 с.
3. Физические основы эластографии. Ч. 1. Компрессионная эластография (лекция) / О. В. Руденко, Д. В. Сафонов, П. И. Рыхтик, С. Н. Гурбатов, С. В. Романов // Радиология – Практика. – 2014. – № 3 (45). – С. 41–50.
4. Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, О. П. Богдан, В. Н. Сяктерев, В. В. Волков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 314–326.
5. ГОСТ 31450-2013. Молоко питьевое. Технические условия. – Введ. 07-01-2014. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103303>
6. *Зубарев, А. В.* Эластография – инновационный метод поиска рака различных локализаций // Поликлиника. – 2009. – № 4. – С. 32–37.

---

*D. V. Zlobin*, CSc in engineering, associate professor

*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor

*V. V. Volkov*, magister student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **The Study of the Acoustic Properties of Biological Media**

*The results of measurements of the acoustic impedance of biological media (glycerin, liver, milk) are presented, the effect of the temperature of the medium and the content of fat components in the medium on the value of the acoustic impedance is evaluated.*

**Keywords:** amplitude-frequency response, acoustic impedance, replacement circuit, longitudinal piezoceramic.

УДК 620.179

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

*И. В. Булдакова*, аспирант

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

*М. А. Понькин*, магистрант

*А. В. Андреев*, студент

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Проектирование электромагнитно-акустического преобразователя продольных волн**

*Приведены результаты моделирования магнитного поля проектируемого электромагнитно-акустического преобразователя. Определены параметры индуктора и рассчитаны его диаграммы направленности.*

**Ключевые слова:** электромагнитно-акустический (ЭМА) преобразователь, магнитная система, индуктор, диаграмма направленности.

### **Введение**

В настоящее время широкое распространение в неразрушающем контроле получили электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи [1–6]. ЭМА-преобразователи позволяют контролировать изделия без специальной подготовки поверхности и без применения контактных жидкостей, а также возбуждать и регистрировать любые типы волн.

Несмотря на явные преимущества ЭМА-преобразователя, он имеет ряд ограничивающих факторов, главным из которых является малый коэффициент преобразования по сравнению с пьезоэлектрическим преобразователем. В связи с этим повышение эффективности ЭМА-преобразователей и исследование их акустических полей являются важной задачей.

Работой над конструкциями магнитных систем ЭМА-преобразователей, способами изготовления и размещения рабочих обмоток занимаются многие исследователи [7–13], однако практически все работы посвящены разработке ЭМА-преобразователей поперечной волны.

---

© Муравьев В. В., Булдакова И. В., Волкова Л. В., Понькин М. А., Андреев А. В., 2018

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-6599.2018.8.

В данной работе представлены результаты расчета распределения магнитного поля и его величины для ЭМА-преобразователя продольной волны.

### Расчет параметров электромагнитно-акустического преобразователя

Конструкция электромагнитно-акустического преобразователя включает в себя два основных элемента: магнитную систему и индуктор (катушку индуктивности). Исследуемая магнитная система представляет собой кольцевой магнит с внешним диаметром 35 мм, внутренним диаметром 20 мм и толщиной 8 мм.

Моделирование магнитного поля системы подмагничивания выполнялось в программной среде COMSOL Multiphysics 5.2a. Результаты моделирования магнитного поля для исследуемой системы подмагничивания и его нормальной  $B_n$  и тангенциальной  $B_\tau$  составляющих вдоль поверхности объекта представлены на рис. 1.

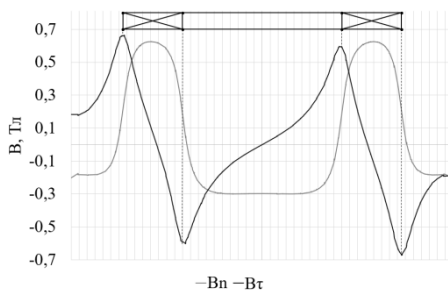


Рис. 1. Распределение составляющих магнитного поля  $B_n$  и  $B_\tau$  под магнитом вдоль объекта контроля

Тангенциальная составляющая магнитного поля отвечает за возникновение продольной волны. Максимальная эффективность преобразования при излучении и приеме продольных волн будет наблюдаться в том случае, если витки катушки индуктора будут охватывать область максимального значения тангенциальной составляющей магнитного поля  $B_\tau$ . По результатам моделирования наибольшее значение тангенциальной составляющей магнитной индукции наблюдалось в области внешнего и внутреннего края магнита.

Для минимизации возможности появления нежелательных поперечных волн, рассматривалось соотношение тангенциальной и нормальной

составляющей  $B_r/B_n = 2$  и  $B_r/B_n = 3$ , по результатам которого определялись размеры катушек индуктивности.

Индуктор в своем составе содержит две катушки, которые имеют встречное направление. По результатам расчетов установлено, что при соотношении  $B_r/B_n = 2$  внутренняя катушка имеет ширину 2,1 мм (3 витка), внешняя – 2,8 мм (4 витка), для соотношения  $B_r/B_n = 3$  внутренняя – 1,4 мм (2 витка), внешняя – 2,1 мм (3 витка), также рассматриваются внутренняя и внешняя катушки шириной 4,2 мм (6 витков). Катушки изготавливались на текстолите толщиной 0,22 мм, при этом ширина дорожки составляет 0,4 мм, расстояние между дорожками – 0,3 мм.

Для определения эффективности работы ЭМА-преобразователя определялась величина зазора между магнитопроводом и поверхностью объекта контроля, соответствующая максимальному значению магнитной индукции, которая определяет коэффициент преобразования, равномерность распределения поля и параметры акустического поля. На рис. 2 представлена кривая ослабления поля подмагничивания с увеличением величины зазора. Наблюдается обратно пропорциональная зависимость – увеличение зазора от 0,1 до 2 мм приводит к уменьшению индукции с 1,1 до 0,5 Тл.

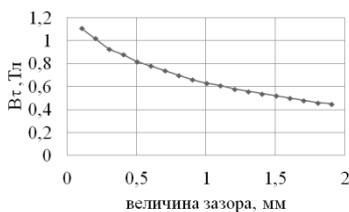


Рис. 2. Максимальное значение магнитной индукции  $B_r$  на поверхности объекта контроля с увеличением зазора

На рис. 3 представлены рассчитанные в программной среде PATAFS Impulse Mode диаграммы направленности для рассматриваемых индукторов. Диаграмма направленности представляет собой совокупность основного и множества боковых лепестков, вследствие чего основная часть энергии сосредоточена в диапазоне углов  $\pm 15^\circ$ . В диаграммах направленности всех индукторов наблюдаются значительные боковые лепестки, которые будут являться причиной акустических помех в процессе измерений. По амплитуде основного лепестка спроектированные индукторы ЭМА-преобразователя различаются в пределах 1 %, по амплитуде максимальных боковых лепестков – 20 %.

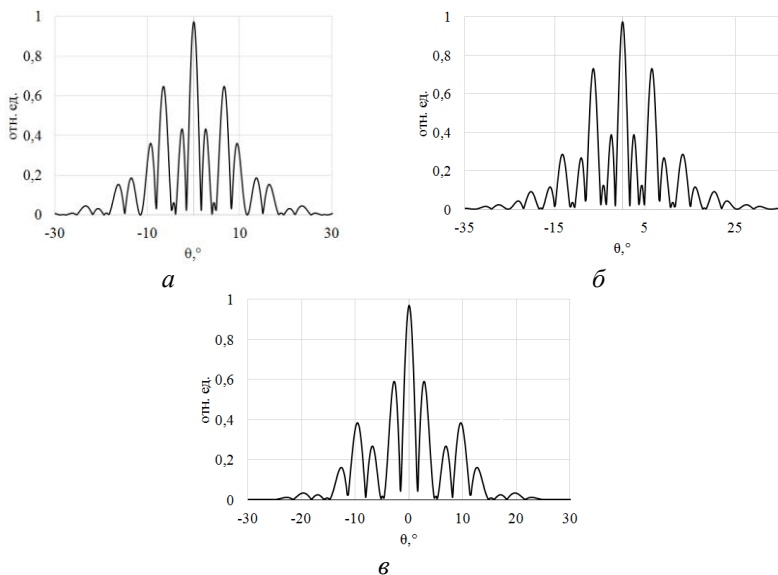


Рис. 3. Диаграммы направленности спроектированных ЭМА-преобразователей на частоте 2,5 МГц: с катушками 3 и 4 витка (а); с катушками 2 и 3 витка (б); с катушками 6 витков (в)

## Выводы

На основе результатов моделирования разработана конструкция электромагнитно-акустического преобразователя продольной волны на базе постоянного магнита и установлено, что:

1. Наибольшее значение тангенциальной составляющей магнитной индукции наблюдается в области внешнего и внутреннего края магнита.

2. Диаграмма направленности рассматриваемых индукторов имеет значительные боковые лепестки, которые будут являться причиной акустических помех в процессе измерений.

Определение характера распределения магнитного поля позволяет анализировать акустическое поле, излучаемое ЭМА-преобразователем, и рассчитывать параметры самого преобразователя. Однако необходимо отметить, что полученные результаты являются лишь приближенным решением задачи, в связи с чем возникает необходимость проверки работы проектируемого ЭМА-преобразователя продольной волны на практике.

### Список литературы

1. Прибор для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, С. В. Ленъков, Н. Н. Зверев // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 3. – С. 142–146.
2. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.
3. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. – С. 34–37.
4. *Муравьев, В. В.* Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 572–577.
5. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Буддакова // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 1. – С. 41–44.
6. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия, 2016. – № 7. – С. 12–20.
7. *Аббакумов, К. Е.* К вопросу об оптимизации параметров электромагнитно-акустических излучателей и приемников // Известия ЛЭТИ. – 1975. – Вып. 168. – С. 19–26.
8. *Буденков, Г. А.* Электромагнитно-акустический способ приема ультразвуковых колебаний / Г. А. Буденков, З. Д. Головочева, Ю. В. Петров // Дефектоскопия. – 1974. – № 4. – С. 20–23.
9. *Буденков, Г. А.* Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики / Г. А. Буденков, О. В. Нездвезкая. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 136 с.
10. *Глухов, Н. А.* Некоторые параметры электромагнитного датчика сдвиговых ультразвуковых колебаний в токопроводящих материалах // Дефектоскопия, 1971. – № 4. – С. 69–74.
11. *Муравьев, В. В.* К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Балобанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1 (17). – С. 197–205.
12. *Муравьева, О. В.* Влияние конструктивных особенностей противофазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2014. – № 9. – С. 41–49.
13. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы, 2013. – № 2 (165). – С. 2–9.



---

V. V. Murav'ev, DSc in engineering, professor, head of  
“Instrumentation and Techniques for Measurement, Testing, Diagnostics” department

I. V. Buldakova, postgraduate student

L. V. Volkova, CSc in engineering, associate professor

M. A. Ponkin, magister student

A. V. Andreev, student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Designing of an Electromagnetic-Acoustic Transducer of Longitudinal Waves**

*The results of simulation magnetic field of design electromagnetic-acoustic transducer are presented. The parameters of the induction work coil are determined and its direction patterns are calculated.*

**Keywords:** electromagnetic-acoustic transducer, magnetic system, induction work coil, direction pattern.

УДК 620.179.141

*В. В. Муравьев*, д-р техн. наук, проф.  
*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф.  
*А. В. Платунов*, канд. техн. наук, доц.  
*Ю. В. Мышкин*, аспирант  
*Д. С. Поташов*, студент  
E-mail: uosp@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Моделирование магнитного поля рассеяния над искусственными дефектами**

*Рассмотрены проблемы эталонирования искусственных дефектов для проверки выявляемости магнитопорошковых индикаторов. Проведено моделирование и сравнительный анализ распределения магнитного поля рассеяния над дефектами различных размеров, выполненных по разным технологиям.*

**Ключевые слова:** магнитопорошковый, поле рассеяния, моделирование, искусственный дефект.

### **Введение**

На сегодняшний день не решена проблема метрологического обеспечения магнитопорошкового метода неразрушающего контроля. Несмотря на то, что метод отнесен к индикаторным (неизмерительным) [1], на практике возникает задача эталонирования дефектов, используемых для проверки выявляемости магнитных индикаторов, иначе говоря – чувствительности метода. Реальные дефекты в объектах имеют случайную форму и размеры; искусственные дефекты, выполненные на стандартных образцах, имеют заданные типоразмеры, но отличающиеся от контролируемого объекта материал и качество поверхности.

В различных отраслях промышленности и транспорта применяют три способа проверки выявляемости дефектов [1, 2]:

1) по отбракованным паспортизированным объектам с естественными дефектами;

---

© Муравьев В. В., Муравьева О. В., Платунов А. В., Мышкин Ю. В., Поташов Д. С., 2018

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерство образования и науки РФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

2) по настроечным образцам с искусственными дефектами (далее – ИД) в материале образца;

3) по настроечным образцам с ИД, выполненным в ферромагнитных вставках в материале объекта.

Ввиду неизвестных типоразмеров естественного дефекта сравнение с двумя другими способами проверки выявляемости дефектов не возможно. Однако в литературе не встречается сравнения второго и третьего из указанных выше способов [3, 4]. Цель настоящей работы – построить модели распределения магнитного поля рассеяния с изготовленными по разным технологиям ИД, провести сравнительный анализ.

### **Описание модели**

В ходе работы в программной среде COMSOL Multiphysics были построены:

1) модели образцов с ИД различных размеров, выполненных на вставках в материал объекта (рис. 1);

2) модели образцов с ИД различных размеров, выполненных непосредственно в материале образца;

3) модели образцов с ИД с различным зазором между материалом вставки и материалом объекта;

4) модели образцов с ИД, выполненных на вставках в материал объекта, ориентированных под различными углами  $\alpha$  к вектору напряженности магнитного поля  $H$  (рис. 1).

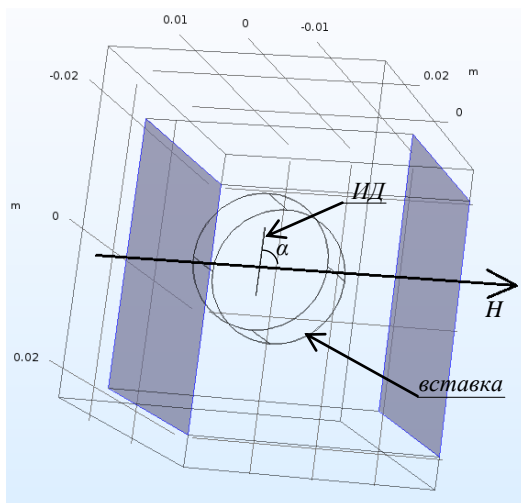


Рис. 1. Модель ИД, выполненного на вставке в материале объекта

Размеры ИД выбраны в соответствии с имеющимися мерами дефектов ОСО-Г-109 – ОСО-Г-111 и указаны в таблице.

#### Параметры ИД, использованные в модели

№	Раскрытие, мкм	Глубина, мкм	Протяженность, мм	Шероховатость поверхности, мкм
1	2	20	10	$Ra \leq 1,25$
2	10	100		
3	25	250		

При моделировании выбраны напряженность магнитного поля  $H = 20$  А/см, разница магнитных свойств материалов образца (объекта) и вставки  $\Delta\mu = 500$ .

#### Результаты моделирования

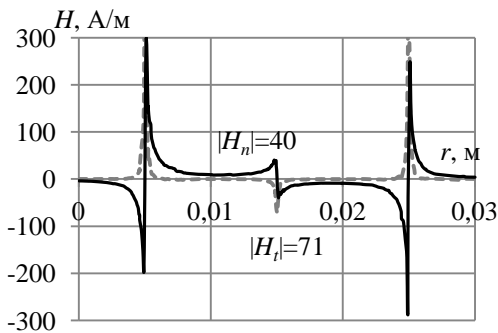
Известно, что максимальная чувствительность магнитопорошкового метода контроля обеспечивается под прямым углом  $\alpha$  между плоскостью дефекта и направлением магнитного потока. При уменьшении угла  $\alpha$  поле рассеяния над дефектом будет также уменьшаться, а выявляемость дефектов снижаться. Условием осаждения магнитного порошка над трещиной является выполнение соотношения [5, 6]:

$$\frac{H_n}{H_t} \leq 3, \quad (1)$$

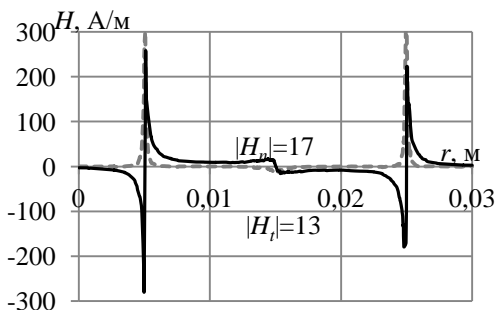
где  $H_n$  – нормальная составляющая напряженности магнитного поля;  $H_t$  – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля.

Согласно полученным топограммам компонент напряженности поля рассеяния над ИД максимальные амплитуды достигаются при угле между плоскостью ИД и вектором напряженности поля  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 2, а), в этом случае обеспечивается максимальная выявляемость дефектов, которая подтверждается четким валиком порошка на дефектограмме. Магнитное поле рассеяния над таким же по размерам дефектом уменьшается с уменьшением угла  $\alpha$ , что характеризуется увеличением соотношения (1) при уменьшении абсолютных значений компонент напряженности. На дефектограмме валик становится менее четким, и если при  $\alpha = 30^\circ$  (рис. 2, б) дефект выявляется, то при  $\alpha = 10^\circ$  (рис. 2, в) валик не откладывается.

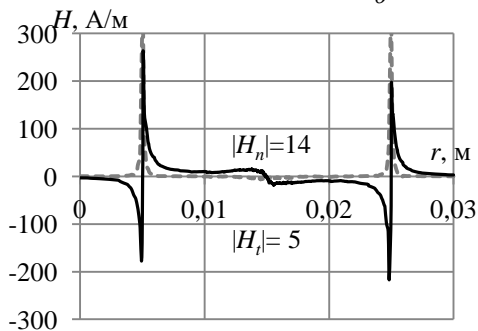
Проведен сравнительный анализ моделей ИД, выполненных на вставках в стали объекта, и моделей ИД, выполненных непосредственно в стали образца.



а



б



в

Рис. 2. Распределение нормальной (сплошная линия)  $H_n$  и тангенциальной (пунктирная линия)  $H_t$  составляющих напряженности магнитного поля рассеяния  $H$  над ИД и соответствующая дефектограмма при угле между плоскостью ИД и вектором напряженности поля  $\alpha = 90^\circ$  (а),  $\alpha = 30^\circ$  (б),  $\alpha = 10^\circ$  (в)

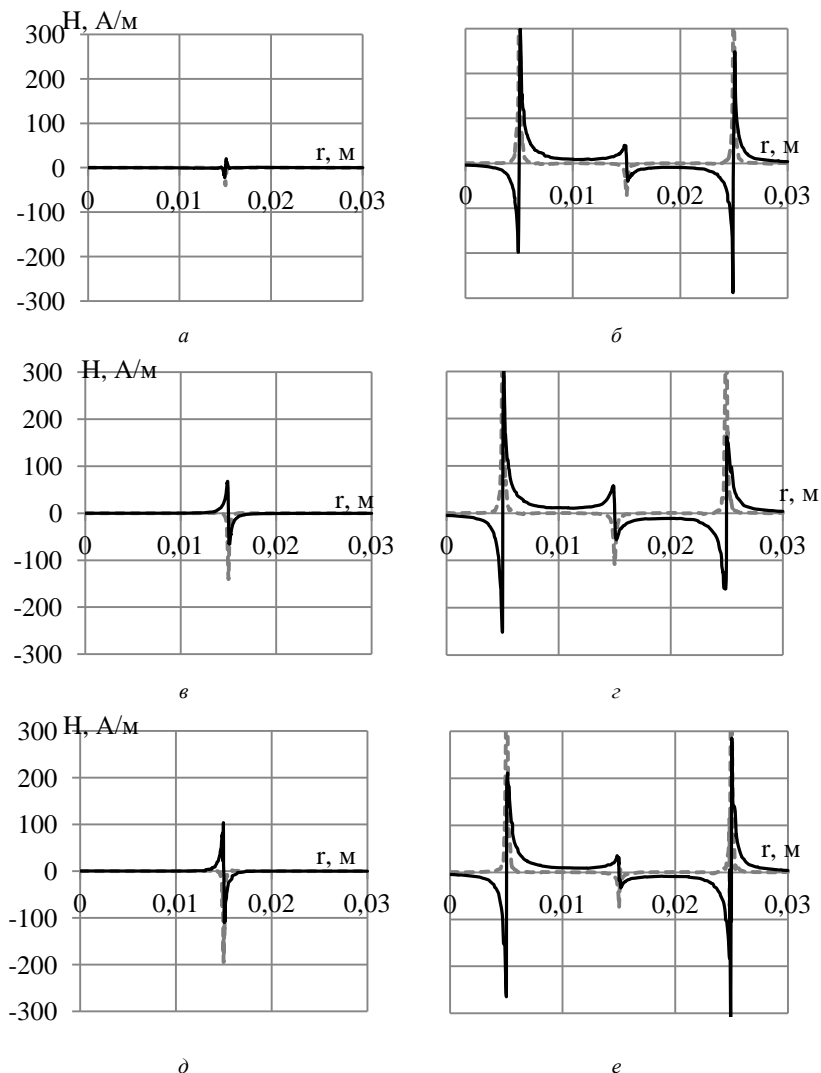


Рис. 3. Распределение нормальной (сплошная линия)  $H_n$  и тангенциальной (пунктирная линия)  $H_t$  составляющих напряженности магнитного поля  $H$  рассеяния над ИД раскрытием  $d = 2$  мкм и глубиной  $h = 20$  мкм (*a*) и над вставкой, содержащей идентичный дефект (*б*);  $d = 10$  мкм,  $h = 100$  мкм (*в*) и над вставкой, содержащей идентичный дефект (*г*);  $d = 25$  мкм и  $h = 250$  мкм (*д*) и над вставкой, содержащей идентичный дефект (*е*)

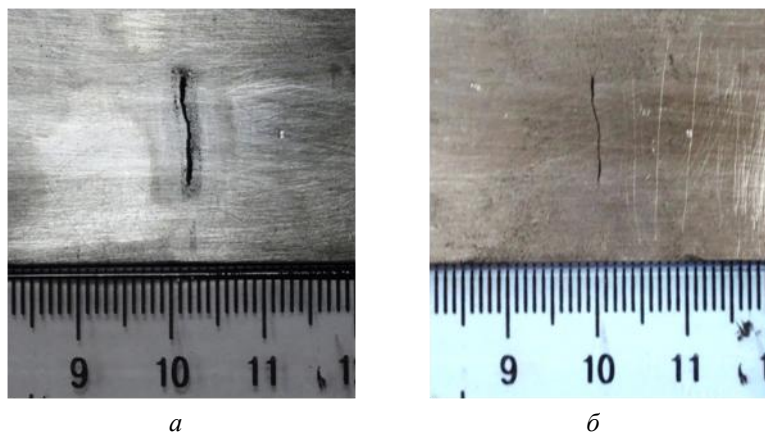


Рис. 4. Дефектограммы стандартного образца с ИД раскрытием 1,2 мкм, полученных с имитацией «вставки» (а) и без имитации (б)

Поле рассеяния над ИД раскрытием  $d = 2$  мкм, выполненным на вставке, более выражено и вызывает отложение более широкого валика порошка, чем над ИД в образце (рис. 3, а, б). Данный факт можно объяснить перераспределением приложенного поля по причине возникновения локальных полюсов на берегах вставки в основной металл образца. Экспериментально также был получен более выраженный валик на имитируемой вставке для ИД  $d = 1,2$  мкм (рис. 4).

Поля рассеяния над ИД раскрытием 10 мкм, выполненным на вставке и в материале образца, сопоставимы (рис. 3, з, д), а при увеличении раскрытия дефекта до 25 мкм более выражено поле рассеяния над ИД, выполненным в материале образца (рис. 3, е), чем над ИД, выполненным на вставке (рис. 3, е).

Проведена оценка влияния зазора между материалом объекта и вставкой, в которой выполнен ИД (рис. 5). Поскольку магнитный поток пересекает границу материалов, имеющий между ними зазор также образует поле рассеяния. Если предположить, что величина зазора совпадает с раскрытием ИД, то поле рассеяния над границей двух материалов (сталь образца и сталь вставки) окажется больше, поскольку глубина такой границы (заполненной диамагнетиком – воздухом) больше глубины ИД.

Результаты моделирования показывают, что уменьшение величины зазора между вставкой, на которой выполнен ИД, и металлом объекта с 50 мкм до 5 мкм приводит к изменению распределения напряженности



поля. Зазор величиной 50 мкм достаточно велик, на берегах зазора возникают большие локальные полюса, которые изменяют направление магнитного потока на вставке на противоположное (рис. 5, *а*). При уменьшении зазора локальные полюса много меньше, они также вызывают поле рассеяния, однако вставка намагничивается в направлении внешнего приложенного поля (рис. 5, *б*).

Изменение зазора под искусственной вставкой в аналогичных пределах не приводит к существенному влиянию на поле рассеяния над ИД.

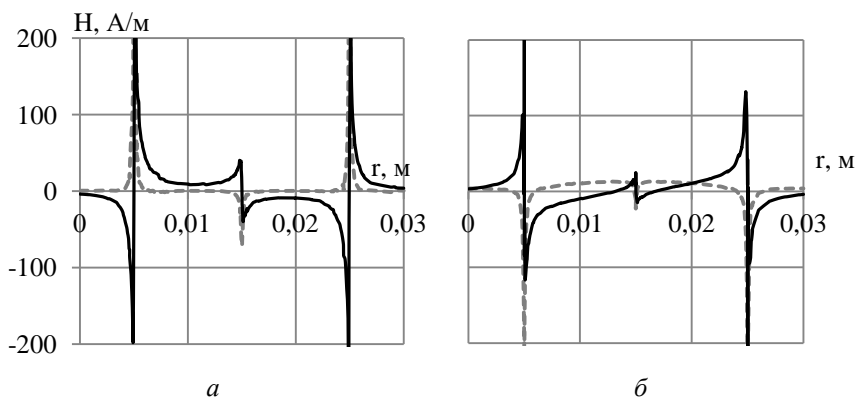


Рис. 5. Распределение нормальной (сплошная линия)  $H_n$  и тангенциальной (пунктирная линия)  $H_t$ , составляющих напряженности магнитного поля  $H$  рассеяния над ИД при зазоре между вставкой, на которой выполнен ИД, и металлом образца 50 мкм (*а*) и 5 мкм (*б*)

## Выводы

Проведено сравнительное моделирование образцов для проверки выявляющей способности магнитных суспензий и проверки работоспособности средств магнитопорошкового контроля, изготовленных по разной технологии: ИД выполнены на вставках в стали объекта и ИД выполнены непосредственно в стали образца. Отмечено уменьшение поля рассеяния при уменьшении угла между плоскостью ИД и направлением магнитного потока. Найдено увеличение магнитного поля рассеяния над ИД, выполненным на вставке при малом раскрытии ИД ( $d = 2$  мкм), и уменьшение магнитного поля рассеяния над ИД, выполненным на вставке при раскрытии ИД более 10 мкм. Полученные результаты можно использовать для обоснования выбора типа ИД для повышения чувствительности магнитопорошкового метода контроля.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – Введ. 2016–06–01. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200122220>
2. ГОСТ Р ИСО 9934-1-2011 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Ч. 1. Основные требования. – Введ. 2013–01–01. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200094384>
3. Кушнер, А. В. Анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов / А. В. Кушнер, В. А. Новиков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 1 (42). – С. 95–105.
4. Расчетные соотношения для разработки программного обеспечения расчета магнитостатических полей дефектов в ферромагнитных изделиях произвольной формы / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин, С. А. Шлеенков, О. А. Булычев // Дефектоскопия. – 2017. – № 11. – С. 3–12.
5. Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужижкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин // Неразрушающий контроль. Т. 6. Справочник / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 832 с.
6. Шелихов, Г. С. Магнитопорошковый контроль / Г. С. Шелихов, Ю. А. Глазков. – М. : СПЕКТР, 2011. – 183 с.

V. V. Muraviev, DSc in engineering, professor  
O. V. Muravieva, DSc in engineering, professor  
A. V. Platanov, candidate in engineering  
U. V. Myshkin, postgraduate student  
D. S. Potashov, student  
E-mail: uosp@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Modeling of Magnetic Stray Fields above Artificial Defects

*The problems of artificial defects standardizing to check the sensitivity of magnetic indicators (suspensions) are considered. The simulation and comparative analysis of the distribution of the magnetic field of scattering over defects of different sizes made by different technologies is carried out.*

**Keywords:** magnetic testing, field of scattering over a defect, modeling, artificial defect.

УДК 534.6.08

*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф.

*О. П. Богдан*, канд. техн. наук, доц.

*М. А. Подсизерцева*, магистрант

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Сравнительная оценка методик определения акустических импедансов вязкоупругих сред**

*Представлены результаты экспериментальных измерений акустических импедансов вязкоупругих сред, основанных на методике измерения параметров амплитудно-частотных характеристик пьезопластины и расчета параметров ее электрической схемы замещения, а также экспериментальные значения коэффициентов затухания стержневой волны в волноводе. Оценка чувствительности рассмотренных методик показала, что чувствительность методики с использованием пьезопластины  $\gamma_p = 0,67 \text{ м}/(\text{Па}\cdot\text{с})$ , а чувствительность методики с использованием волновода  $\gamma_w = 2,03 \text{ (Па}\cdot\text{с)}^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** акустический импеданс, вязкоупругая среда, пьезопластина, эквивалентная электрическая схема, стержневая волна, коэффициент затухания.

### **Введение**

Акустические параметры упругих волн широко используются для оценки свойств материалов, например напряженно-деформированного и структурного состояния металла [1], а измерение характеристик технологических жидкостей, изменяющихся с течением времени в процессе эксплуатации, позволяет оценить их качество [2].

Целью данной работы является сравнительная оценка методик определения акустического импеданса вязкоупругих сред, одна из которых основана на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, а другая - на измерении коэффициента затухания стержневой волны в волноводе.

---

© Муравьева О. В., Богдан О. П., Подсизерцева М. А., 2018

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерство образования и науки РФ ФГБОУ ВО «ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

### Методика измерения акустического импеданса

Методика оценки продольного и сдвигового импедансов вязкоупругих сред [3] основана на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик пьезопластины (ПП), последовательно нагруженной на воздух, среду с известным акустическим импедансом (эталонную среду) и исследуемую среду. Используя полученные амплитудно-частотные характеристики, рассчитываются параметры электрической схемы замещения пьезопластины (рис. 1), и акустический импеданс исследуемой среды определяется по формуле

$$Z = \frac{U_{RI}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{RI0}^2 U_C^2 R_I f_r^2} = K \cdot Z_0, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от свойств исследуемой среды;  $U_C$  и  $U_{C0}$  – напряжения на конденсаторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду,  $U_{RI}$  и  $U_{RI0}$  – напряжение на резисторе  $R_I = R - R_V$  и  $R_{I0} = R_0 - R_V$ ,  $R$  и  $R_0$ ,  $R_V$  – модуль значения сопротивления на резисторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую среду (рис. 1), эталонную среду и воздух;  $f_r$  и  $f_{r0}$  – частота резонанса амплитудно-частотной характеристики при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду;  $Z_0$  – акустический импеданс эталонной среды.

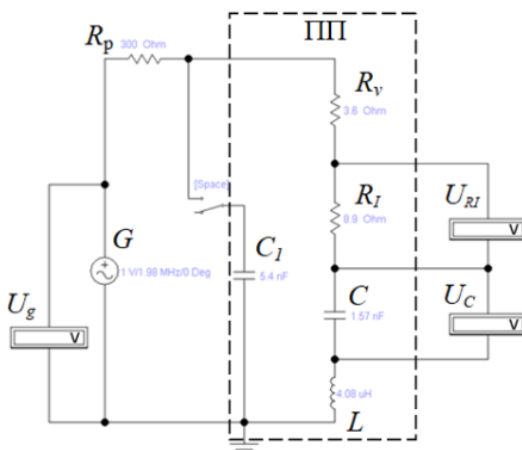


Рис. 1. Измерительная схема в программе Electronic Workbench:  $R_p$  – сопротивление развязки;  $U_g$  – напряжение генератора  $G$ ;  $R_I$  и  $R_V$  – модули импеданса пьезопластины, нагруженной на исследуемую среду и воздух соответственно;  $C_1$  – геометрическая емкость пьезопластины;  $C$  и  $L$  – эквивалентные емкость и индуктивность пьезопластины соответственно

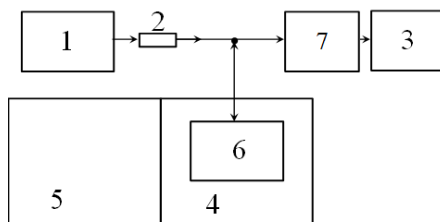


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки: 1 – генератор, подающий напряжение  $U_g$ ; 2 – сопротивление развязки  $R_p$ ; 3 – осциллограф; 4 – емкость с исследуемой жидкостью; 5 – емкость с эталонной жидкостью; 6 – пьезопластина; 7 – усилитель

Блок-схема установки для измерения акустического импеданса среды представлена на рис. 2, параметры которой приведены в табл. 1

Таблица 1. Параметры измерительной установки

Сопротивление развязки $R_p$ , Ом	Коэффициент усиления	Амплитуда сигнала генератора $U_g$ , В	Размеры ПП, мм	Геометрическая емкость $C$ , нФ
300	11	1	20x20x1	5,40

### Методика измерения затухания среды

При анализе акустических свойств сред могут применяться нормальные волны, распространяющиеся в волноводе [4–6]. В работе [7] показана возможность возбуждения и приема стержневой волны с помощью электромагнитно-акустического излучателя с акустическим волноводом, работа которого основана на эффекте магнитострикции. Для этого используется в качестве волновода проволока из сплава викаллой длиной  $r = 260$  мм и диаметром  $d = 0,5$  мм, на конце которой расположена проходная катушка шириной  $L = 1$  мм с переменным током (рис. 3), обеспечивающая деформацию растяжения-сжатия вдоль стержня, что приводит к возникновению моды  $L(0,1)$  стержневой волны.

Возбуждение электрического тока в обмотке катушки и прием сигналов, поступающих с колеблющегося волновода, производится с использованием электромагнитно-акустического дефектоскопа «ДЭМА-П» (рис. 4), подключенного к персональному компьютеру, для вывода на экран при помощи программы «ПРИНЦ» регистрируемых эхоимпульсов с целью определения их амплитуды. На рис. 5 показаны эхограммы сигналов, принятых с колеблющегося волновода, нагруженного на воздух и глицерин.

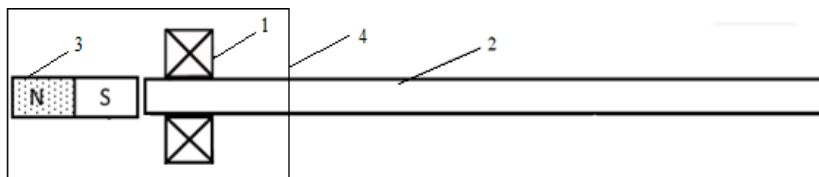


Рис. 3. Устройство датчика: 1 – проходная катушка индуктивности; 2 – волновод; 3 – постоянный магнит; 4 – корпус

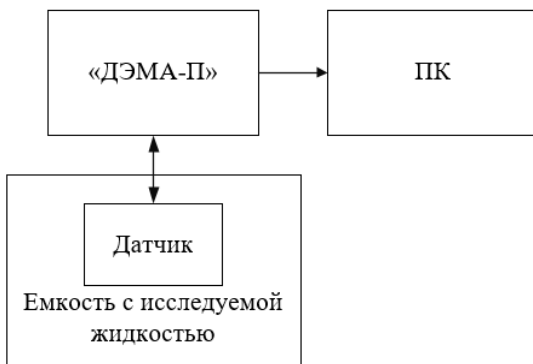


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

Для определения коэффициента затухания  $\delta_0$  в свободном волноводе измеряются амплитуды первого  $U_1$  и четвертого  $U_4$  импульсов сигнала (рис. 5, а), и величина затухания  $\delta_0$  рассчитывается по формуле

$$\delta_0 = \frac{\ln\left(\frac{U_4}{U_1}\right)}{2r_0n}, \quad (2)$$

где  $r_0$  – длина волновода;  $n$  – количество принятых импульсов;  $\delta_0$  – коэффициент затухания в свободном волноводе.

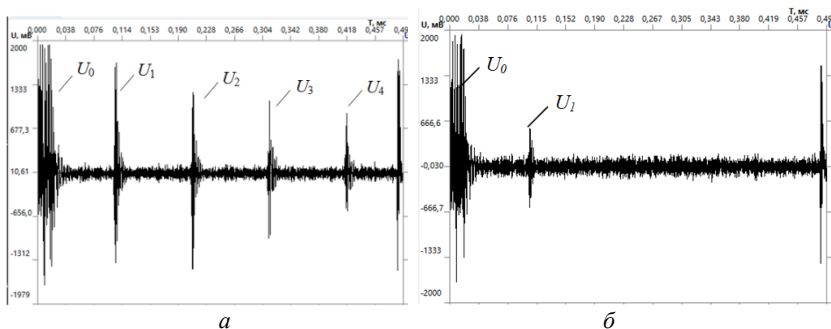


Рис. 5. Серия эхоимпульсов для воздуха (а) и глицерина (б)

Значения коэффициента затухания стержневой волны  $\delta_0$  и амплитуды импульса  $U_0$  стержневой волны в свободном волноводе являются постоянными, что дает возможность рассчитать коэффициент затухания  $\delta$  стержневой волны в волноводе, нагруженном на среду (рис. 5, б) с помощью формулы

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{U_1}{U_0}\right) + \delta_0 2n(r_0 - r)}{2rn}, \quad (3)$$

где  $r$  – длина волновода, погруженного в жидкость.

Акустический импеданс исследуемой среды определяется методом калибровочного графика (рис. 6), который представляет собой зависимость коэффициента затухания стержневой волны в волноводе, нагруженного на среды с известными справочными значениями акустического импеданса, измеренного опытным путем, от величины акустического импеданса этих сред.

### Результаты и их обсуждение

Экспериментально определены акустические импедансы и коэффициенты затухания вязких сред: воздух, вода, моторное масло, глицерин, водный раствор глицерина (соотношение 2:1), водный раствор глицерина (соотношение 1:1). Результаты измерений представлены в табл. 2.

Чувствительность  $\gamma$  рассмотренных методик можно определить по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta P_{\text{изм}}}{\Delta P_{\text{ан}}}, \quad (4)$$

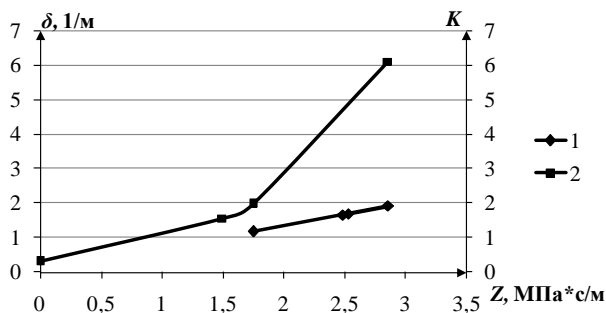
где  $\Delta P_{\text{изм}}$  – изменение измеряемой величины (коэффициент  $K$  или коэффициент затухания стержневой волны  $\delta$  в зависимости от используемой методики измерения);  $\Delta P_{\text{ан}}$  – изменение анализируемой величины (акустический импеданс  $Z$ ).

**Таблица 2. Экспериментальные значения акустических импедансов  $Z$  и коэффициентов затухания  $\delta$  исследуемых сред**

Среда	$Z \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}$	$\delta, 1/\text{м}$
Воздух	0,00043 (справочное)	0,29
Вода	1,5 (справочное)	1,55
Масло моторное	1,75	1,97
Глицерин	2,86	6,11
Водный раствор глицерина (2:1)	2,53	–
Водный раствор глицерина (2:2)	2,49	–

Чувствительность методики оценки акустического импеданса, основанной на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины, равна  $\gamma_p = 0,67 \text{ м}/(\text{Па} \cdot \text{с})$ . При этом чувствительность методики оценки акустического импеданса, основанной на измерении коэффициента затухания стержневой волны  $\delta$ , составляет  $\gamma_w = 2,03 (\text{Па} \cdot \text{с})^{-1}$ .

График (рис. 6) наглядно показывает, что изменение акустического импеданса ведет к большему изменению коэффициента затухания стержневой волны в волноводе по сравнению с изменением амплитуды колебаний пьезопластины в резонансе.



**Рис. 6.** График зависимости изменения измеряемых величин от акустического импеданса среды: 1 – коэффициент затухания стержневой волны  $\delta$ ; 2 – коэффициент  $K$



## Заключение

Таким образом, сравнительная оценка методик определения акустического импеданса вязкоупругих сред показывает, что чувствительность методики, основанной на измерении коэффициента затухания стержневой волны в волноводе ( $\gamma_w = 2,03 \text{ (Па}\cdot\text{с)}^{-1}$ ), значительно выше чувствительности методики, основанной на измерении параметров амплитудно-частотных характеристик и расчете элементов электрической схемы замещения пьезопластины ( $\gamma_p = 0,67 \text{ м/(Па}\cdot\text{с)}$ ). Соответственно, измерение коэффициента затухания может быть более эффективно при оценке изменения акустического импеданса технологических жидкостей, изменяющихся с течением времени в процессе эксплуатации.

## Список литературы

1. *Муравьев, В. В.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В. В. Муравьев, К. А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270.
2. *Чуприн, В. А.* Контроль жидких сред с применением ультразвуковых нормальных волн. – М. : Спектр, 2015. – 218 с.
3. Методика и устройство для экспериментальной оценки акустического импеданса вязкоупругих сред / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, О. П. Богдан, В. Н. Сяктерев, В. В. Волков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 4. – С. 314–326.
4. *Есипов, И. Б.* Резонансный метод измерения сдвиговых вязкоупругих свойств жидких сред на основе возбуждения крутильных колебаний в трубках / И. Б. Есипов, О. М. Зозуля, А. В. Фокин // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56. – № 1. – С. 124–134.
5. Импедансный метод измерения сдвиговой упругости жидкостей / Б. Б. Бадмаев, Т. С. Дембелова, Б. Б. Дамдинов, Ч. Ж. Гулгенов // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63. – № 6. – С. 602–605.
6. Пат. 2529634 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/028, G 01 N 15/06. Способ измерения продольного и сдвигового импедансов жидкостей / Чуприн А. В., Чуприн В. А., Чуприна Т. Ф. – Заявл. 27.03.2014 ; опубли. 27.09.2014, Бюл. № 27. – 6 с.
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 СО РАН, 2017. – 234 с.

*O. V. Murav'eva*, DSc in engineering, professor  
*O. P. Bogdan*, CSc in engineering, associate professor  
*M. A. Podszertseva*, magister student  
E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Comparative Evaluation of Acoustic Impedances Measurement of Viscoelastic Media**

*The experimental measurements results of viscoelastic media acoustic impedances, which based on the technique of the parameters piezoelectric plate amplitude-frequency characteristics measurement and calculation of the parameters of piezoelectric plate equivalent electrical circuit, also the experimental values of the attenuation coefficients of the rod wave in the waveguide. The sensitivity assessment of the techniques showed that the sensitivity of the technique using a piezoelectric plate is  $\gamma_p = 0.67 \text{ m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ , and the sensitivity of the technique using a waveguide is  $\gamma_w = 2.03 (\text{Pa}\cdot\text{s})^{-1}$ .*

**Keywords:** acoustic impedance, viscoelastic media, piezoelectric plate, equivalent electrical circuit, rod wave, attenuation coefficient.

УДК 620.179.161

*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф.

*В. А. Зорин*, аспирант

*М. А. Синцов*, начальник лаборатории

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Выбор критериев браковки при акустическом контроле проката для производства бурильных труб с использованием рэлеевских волн**

*Обоснованы критерии браковки проката для производства бурильных труб электромагнитно-акустическим многократным теневым методом контроля с использованием рэлеевских волн. В качестве информативных параметров использованы вероятностные характеристики серии многократных прохождений по огибающей прутка.*

**Ключевые слова:** рэлеевские волны, прокат для производства бурильных труб, электромагнитно-акустический метод, вероятностные характеристики сигнала.

### **Введение**

При бурении нефтяных и газовых скважин используют специализированные стальные бурильные трубы. Разрушение их в условиях эксплуатации приводит к значительным экономическим потерям, поэтому эти трубы должны отличаться повышенной надежностью. Повышения прочностных характеристик труб для бурения добиваются путем утолщения их стенок. Кроме повышенной толщины для высокой надежности необходимо обеспечить выявление дефектов как на поверхности, так и внутри стенки трубы в процессе производства. Производство и контроль бурильных труб проводится по стандартам ISO 11961:2008 [1]. Согласно этому стандарту основным видом неразрушающего контроля для труб является электромагнитный контроль (метод рассеяния магнитного поля или метод вихревых токов). Ультразвуковой контроль рекомендуется к использованию при контроле прутков-заготовок для

---

© Муравьева О. В., Зорин В. А., Синцов М. А., 2018

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

производства бурильных труб и проводится согласно ISO 10424-1:2004 [2] с использованием иммерсионного способа поиска дефектов. Используемые установки многоканального ультразвукового контроля с использованием поперечных и продольных волн требуют продольно-поперечного сканирования, осуществляемого за счет поступательно-вращательного движения проката [3]. Последнее существенно ограничивает производительность установок ультразвукового контроля. Использование варианта иммерсионного контакта приводит к снижению достоверности, особенно при масляных загрязнениях поверхности. Применение электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей для возбуждения и приема рэлеевских волн позволяет устранить влияние качества контакта на результаты контроля, тем самым обеспечивая повышение его достоверности [4–9]. Использование рэлеевских волн позволяет выявлять дефекты и структурное состояние в пределах поверхностного слоя, равного половине длины рэлеевской волны, при этом глубина выявляемых дефектов может варьироваться при изменении частоты колебаний [10–13].

В статье представлены результаты использования предложенного в [14] электромагнитно-акустического (ЭМА) метода многократной тени с использованием рэлеевских волн при контроле цилиндрических объектов для обоснования критериев браковки проката для контроля бурильных труб.

Формирование критериев браковки производится на стандартном образце – пруток-заготовка для изготовления бурильной трубы диаметром 105 мм и длиной 400 м с выполненными на его поверхности искусственными дефектами согласно ISO 10424-1:2004, имитирующими продольные и поперечные трещины (рис. 1):

- перпендикулярно образующей цилиндра с размерами  $30 \times 1 \times 2,3$  мм на расстоянии 150 мм от края;
- вдоль образующей цилиндра с размерами  $53 \times 1 \times 2,3$  мм на расстоянии 247 мм от края.

### **Описание эксперимента**

Дефекты разнесены по длине прутка относительно друг друга и от края, чтобы исключить их взаимовлияние и краевые эффекты.

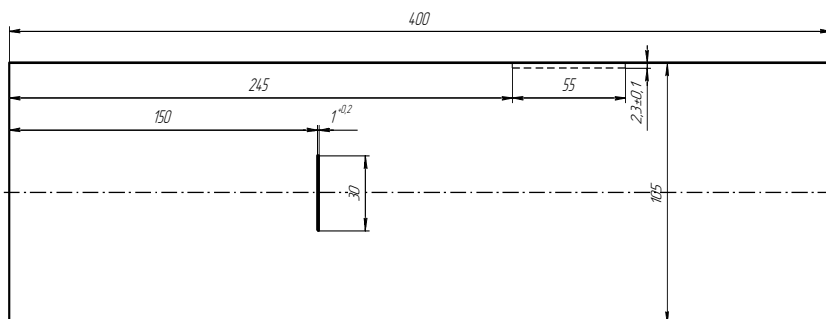


Рис. 1. Чертеж прутка с искусственными дефектами

При исследованиях использован метод многократной тени, реализованный с использованием структуроскопа СЭМА [15], фото экспериментальной установки представлено на рис. 2, *а*. Специализированный накладной ЭМА-преобразователь обеспечивает бесконтактное возбуждение и прием рэлеевских волн, распространяющихся по периметру образца в прямом и обратном направлениях (рис. 2, *б*). ЭМА-преобразователь имеет два канала, работающие на частотах 1 МГц и 500 кГц, что позволяет обнаруживать дефекты, расположенные в пределах длины рэлеевской волны – на глубинах до 3 мм и 6 мм соответственно. Основная частота в спектре сигнала около 1 МГц, максимальная глубина выявляемых дефектов в пределах длины рэлеевской волны составляет около 3 мм.

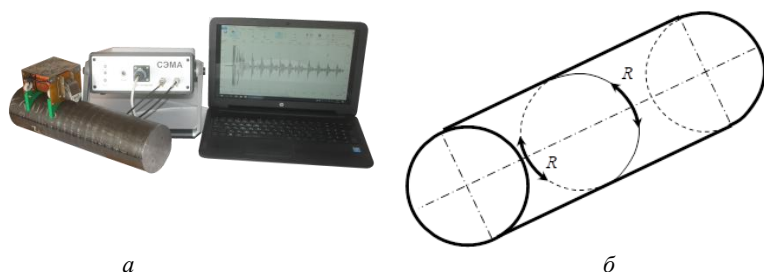


Рис. 2. Фото установки контроля (*а*), схема распространения рэлеевских волн по огибающей объекта (*б*)

Результатом прозвучивания является серия импульсов рэлеевских волн, многократно прошедших в прямом и обратном направлениях по

огibaющей прутка (рис. 3, *а*). Наличие дефекта на пути следования рэлеевской волны приводит к ослаблению серии импульсов волн (рис. 3, *б*).

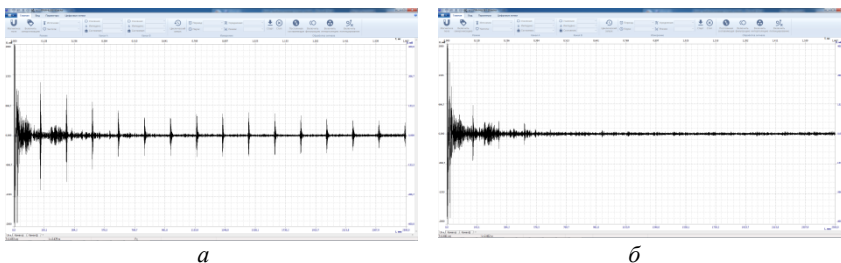


Рис. 3. Эхограммы рэлеевских волн: *а* – бездефектная область, *б* – область с искусственным дефектом – поперечный пропил

Проведено сканирование прутка с шагом 10 мм. Анализировались вероятностно-статистические параметры серии импульсов многократных отражений: математическое ожидание  $M$ , дисперсия  $D$ , среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ , асимметрия  $As$  и эксцесс  $Ex$  [16]. Расчет вероятностно-статистических характеристик производился с использованием специализированного программного обеспечения ПРИНЦ IX (рис. 4).

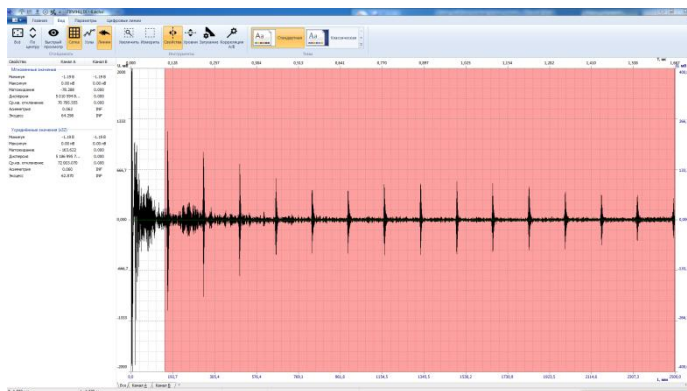


Рис. 4. Оценка вероятностных характеристик с использованием специализированного программного обеспечения

## Результаты

Полученные значения статистических характеристик по длине образца для рэлеевской волны на частоте 1 МГц сведены в гистограммы по длине образца, представленные на рис. 5.

Анализ вероятностно-статистических характеристик показывает, что математическое ожидание не коррелирует с наличием искусственных дефектов в образце. Характеристики дисперсии и среднеквадратического отклонения имеют тенденцию к уменьшению в сравнении с бездефектной областью. При этом наибольшее уменьшение наблюдается для искусственного дефекта, ориентированного перпендикулярно направлению распространения волны (по образующей прутка) – со значения  $D = 2300 \text{ мВ}^2$  (среднее значение для бездефектной области) до  $D = 500 \text{ мВ}^2$ . Для дефекта, ориентированного вдоль направления распространения волны (по огибающей прутка), значение дисперсии области с дефектом  $D = 900 \text{ мВ}^2$ , при этом в области вблизи поперечного дефекта наблюдается неоднозначность в поведении характеристик дисперсии, что может объясняться результатом интерференции волн, частично отраженных от дефекта расходящейся акустической волны. Наблюдается также резкое уменьшение характеристик асимметрии и эксцесса для продольного дефекта с уходом в отрицательную область. Для поперечного дефекта имеет место резкое уменьшение до нуля характеристики асимметрии, а параметр эксцесс находится на среднем уровне бездефектной области. Совместное использование параметров дисперсии, асимметрии и эксцесса позволяет определить преимущественную ориентацию выявленного дефекта.

Уменьшение указанных характеристик вблизи торцев прутка обусловлено краевыми эффектами и показывает невозможность выявления дефектов вблизи торца объекта в пределах апертуры преобразователя (30 мм).

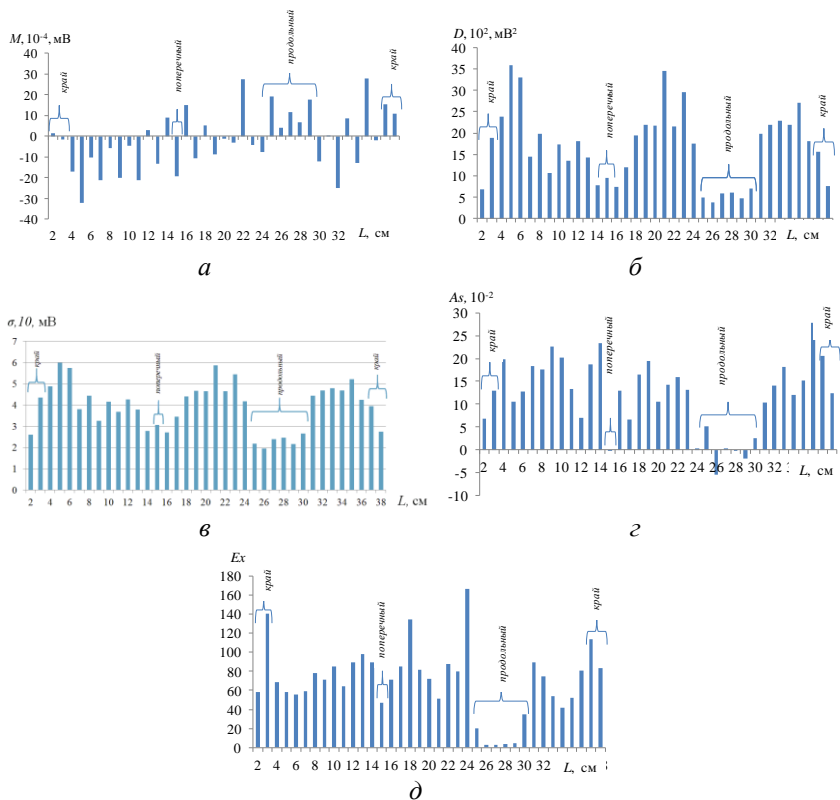


Рис. 5. Вероятностные характеристики рэлеевских волн после сканирования объекта по длине: *а* – математическое ожидание, *б* – дисперсия, *в* – среднеквадратическое ожидание, *г* – асимметрия, *д* – эксцесс

## Выводы

Таким образом, метод многократной тени с использованием рэлеевских волн обеспечивает возможность выявления искусственных дефектов прутков-заготовок бурильных труб согласно ISO 10424-1:2004 при использовании в качестве критериев браковки вероятностных характеристик серии многократных проходов – дисперсии, асимметрии, эксцесса.

К существенным достоинствам предлагаемой методики следует отнести:



- более высокую производительность контроля за счет необходимости сканирования только по образующей прутка;
- повышение достоверности и воспроизводимости результатов контроля за счет отстройки от качества акустического контакта благодаря использованию бесконтактного ЭМА-способа возбуждения-приема;
- отсутствие мертвой зоны, возможность выявления дефектов произвольной ориентации в отличие от эхо-метода контроля.

### Список литературы

1. Spec API 5DP (ISO 11961: 2008) Спецификация для бурильной трубы. – 2009.
2. ISO 10424-1:2004 Petroleum and natural gas industries. Rotary drilling equipment. Part 1: Rotary drill stem elements. – 2004.
3. *Ермолов, И. Н.* Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. // *Не разрушающий контроль* : справ. : в 8 т. Т. 3 / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, НИИИМ МНПО «Спектр», 2008. – 864 с.
4. *Петров, К. В.* Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов / К. В. Петров, М. Ю. Соков, О. В. Муравьева // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2018. – № 2. – С. 135–146.
5. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // *Дефектоскопия*. – 2016. – № 7. – С. 12–20.
6. *Муравьев, В. В.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В. В. Муравьев, К. А. Тапков // *Приборы и методы измерений*. – 2017. – Т. 8. – № 3. – С. 263–270.
7. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 11–23.
8. *Стрижак, В. А.* Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. В. Пряхин // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 159–166.
9. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократного-теневое электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2016. – № 3. – С. 46–50.
10. *Полупан, А. В.* Ультразвуковой контроль поверхностными волнами. – М. : Спектр, 2014. – 120 с.
11. *Толитов, Х. Б.* Экспериментальная установка для бесконтактного измерения скорости и амплитуды смещений волны Рэлея с малого участка поверхности // *Приборы и техника эксперимента*. – 2015. – № 1. – С. 175–177.

12. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

13. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

14. *Муравьева, О. В.* Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркальнотеневым методом многократных отражений / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 12. – С. 11–19.

15. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркальнотеневым 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.

*O. V. Muraveva*, DCs in engineering, professor

*V. A. Zorin*, postgraduate student

*M. A. Sintsov*, head of laboratory

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Selelction of the Rejection Criteria under Acoustic Testing of Rolled Products Using Rayleigh Waves for Drill Pipes Production**

*The rejection criteria of rolled products for making drill pipes under electromagnetic-acoustic multiple shadow method of testing using Rayleigh waves is explained. The probabilistic characteristics of multiple pass on envelope curve of bar are used as informative parameters.*

**Keywords:** Rayleigh waves, rolled products for making drill pipes, electromagnetic-acoustic method, probabilistic characteristics of signal.

---

УДК 620.1

Ю. В. Мышкин, ст. преподаватель  
О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф.  
А. А. Фотина, магистрант  
E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Обоснование применения изгибной волны для оценки толщины стенки трубы**

*Представлена теория определения толщины стенки трубы на основе определения разности скорости распространения изгибной волны. Приведены зависимости скорости распространения изгибной волны моды  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$ , на примере которых показана возможность реализации методики определения толщины стенки трубы на определенном диапазоне частот.*

**Ключевые слова:** изгибная волна, волноводный контроль, труба, дисперсия.

### **Введение**

В современном волноводном контроле при поиске дефектов используются различные типы волн. Наибольшее применение нашли крутильная волна моды  $T(0,1)$  и продольная волна –  $L(0,2)$  [1–9] в диапазоне частот от 20 до 80 кГц, поскольку данные типы мод являются осесимметричными и схемы их возбуждения и приема очень просты. Крутильная волна нулевой моды  $T(0,1)$  по сравнению с другими модами и типами волн также имеет ряд преимуществ [10–15]: отсутствие дисперсии, высокая чувствительность, меньшее затухание.

В последнее время возрос интерес к изгибной волне с точки зрения приема и анализа отраженных трансформированных мод изгибной волны. Различные авторы [16–23] исследуют возможности использования изгибной волны при оценке координат, форм и размера дефектов, рассматривают влияние вязоупругих контактных сред на затухание мод низкого порядка [24, 25].

Также исследуются различные типы преобразователей и способы возбуждения изгибной волны [18–23]. При этом основные возбуждаемые типы мод изгибной волны не зависят от форм и размеров объекта контроля. Так, при контроле тросов и тонких прутков используются моды  $F(1,1)$ ,  $F(2,1)$ ,  $F(2,2)$  [26–28], при контроле прутков и цилиндриче-

---

© Мышкин Ю. В., Фотина А. А., 2018

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122)

ского проката –  $F(1,1)$ ,  $F(1,2)$  [29, 30], при контроле труб и трубопроводов –  $F(1,1)$  или  $F(1,2)$  [31].

Таким образом, изгибная волна находит все большее применение в акустическом волноводном контроле, расширяя диапазон контролируемых изделий и выявляемых типов дефектов. В статье представлены результаты исследований возможности применения изгибной волны для оценки толщины стенки.

### Используемые подходы

Основной характеристикой нормальных волн является дисперсия ее скорости. Для расчета дисперсионных кривых изгибных волн использовалась специализированная программа Elastic Waveguide Tracer, которая основана на численном методе решения дисперсионных уравнений Похгаммера – Кри [32–34]. На основе известной скорости распространения изгибной волны, рассчитанной по дисперсионным кривым, и частоты представленная методика дает возможность установить толщину стенки трубы при известном внешнем диаметре.

В работе при расчетах исследовалась труба с фиксированным внутренним диаметром 62 мм и толщиной стенки от 0,5 до 5,5 мм, при этом считалось, что толщина стенки и внешний диаметр имеют переменное значение. В качестве примера на рис. 1 приведены рассчитанные эпюры смещений моды изгибной волны  $F(1,1)$  в трубе с внешним диаметром 73 мм.

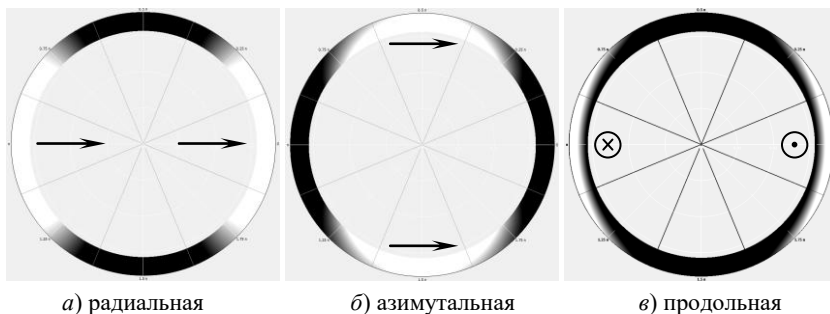


Рис. 1. Компоненты эпюры смещений изгибной волны моды  $F(1,1)$  в стальной трубе диаметром 73 мм с толщиной стенки 5,5 мм на частоте 25 кГц: белый цвет соответствует максимальной амплитуде смещений компоненты

При экспериментальных исследованиях использовалась труба диаметром 73 мм и толщиной стенки 5,5 мм, которая была разделена на 36 секторов, по 10 градусов в азимутальном направлении, в каждом из которых проводилось измерение приемным преобразователем (рис. 2, б). Для возбуждения изгибной волны использовалось четыре электромагнитно-акустических преобразователя (рис. 1, а), при этом прием сигнала проводился на противоположной стороне пьезоэлектрическим преобразователем с сухим точечным контактом.

Основная частота в спектре импульса сигнала составила 11,4 кГц.

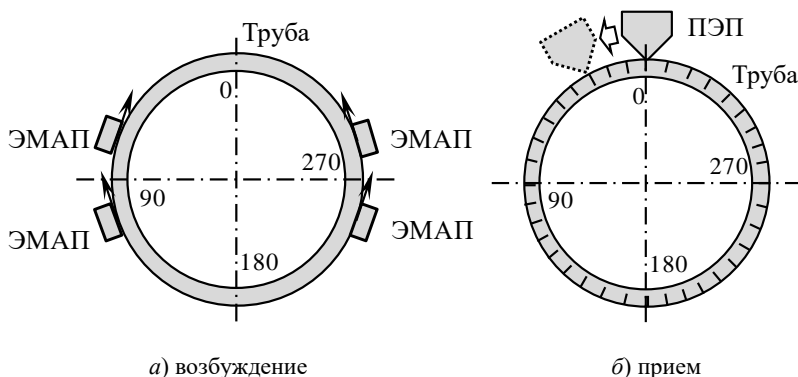


Рис. 2. Схема установки излучающих электромагнитно-акустических (ЭМАП) и приемного пьезоэлектрического (ПЭП) преобразователей при возбуждении (а) и регистрации (б) изгибной волны: стрелками указано направление касательных напряжений

Экспериментальная установка (рис. 3) включала в себя излучающие и приемный преобразователи, блок генератора зондирующих импульсов и усилителя, блок коммутации и управления, аналого-цифровой преобразователь, встроенный в персональный компьютер. Результатом измерений являлась эхограмма, регистрируемая с помощью специализированного программного обеспечения.

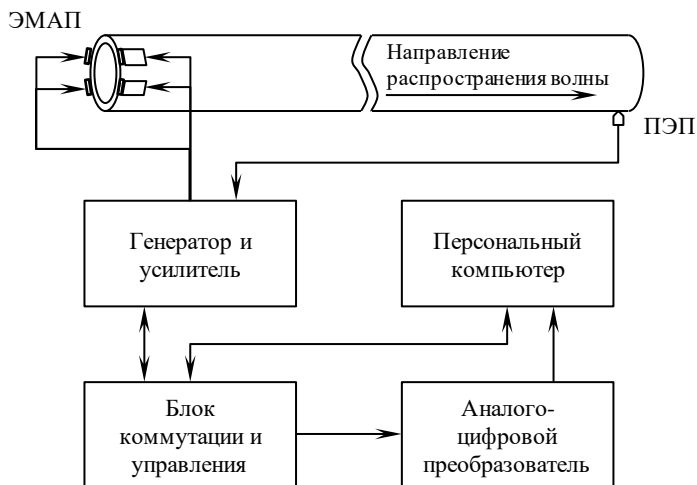


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: ЭМАП – электромагнитно-акустический преобразователь, ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

### Теоретические расчеты

Зависимость групповой скорости от частоты для различных толщин цилиндра от 0,5 мм до 5,5 мм при модах  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$  представлена на рис. 4. При моде  $F(1,1)$  наблюдается уменьшение групповой скорости при уменьшении толщины стенки цилиндра на частотах от 15 кГц. Так, при частоте 40 кГц для цилиндров диаметром 73, 69 и 65 мм групповая скорость равна 1843, 1496 и 987 м/с соответственно.

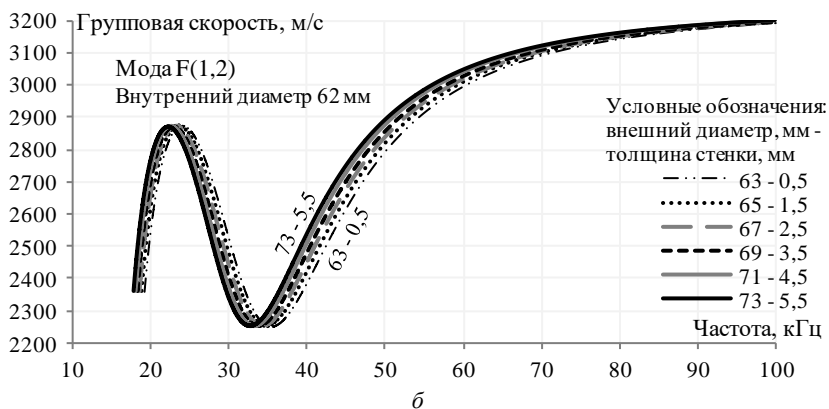
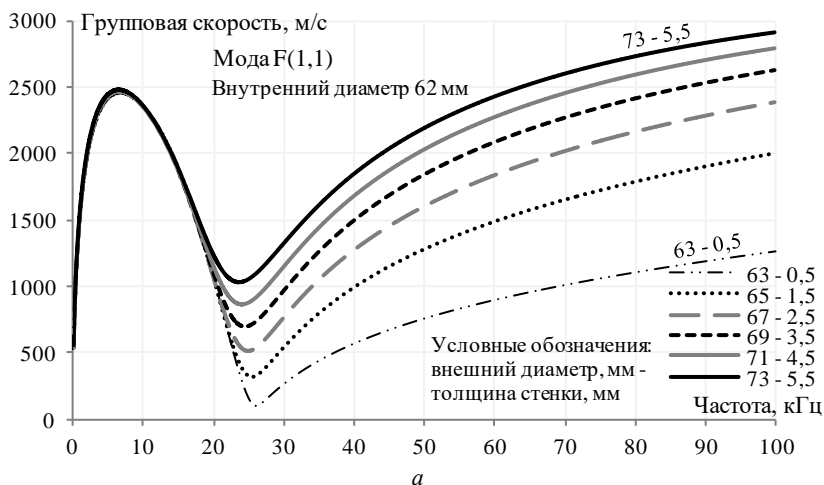


Рис. 4. Дисперсионные кривые групповой скорости изгибной волны для моды  $F(1,1)$  (а) и моды  $F(1,2)$  (б)

На рис. 5 представлены зависимости разности групповой скорости от частоты при изменении толщины стенки трубы с внутренним диаметром 62 мм на 5 мм (от 0,5 мм до 5,5 мм) для мод  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$ . Так, на частоте 40 кГц разности групповых скоростей для мод  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$  равны 1315 и 213 м/с соответственно.

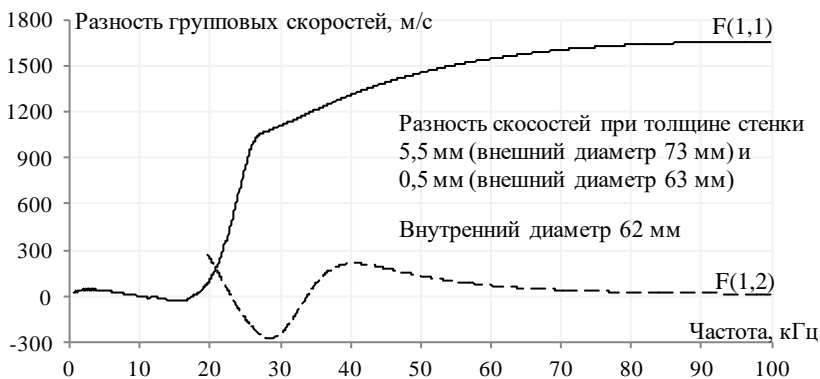


Рис. 5. Зависимость групповой скорости от частоты при изменении толщины стенки трубы

Зависимости разности фазовой скорости от частоты при изменении толщины стенки трубы на 5 мм для мод  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$  представлены на рис. 6. Так, на частоте 40 кГц разности фазовых скоростей мод  $F(1,1)$  и  $F(1,2)$  равны 1040 м/с и 219 м/с соответственно.

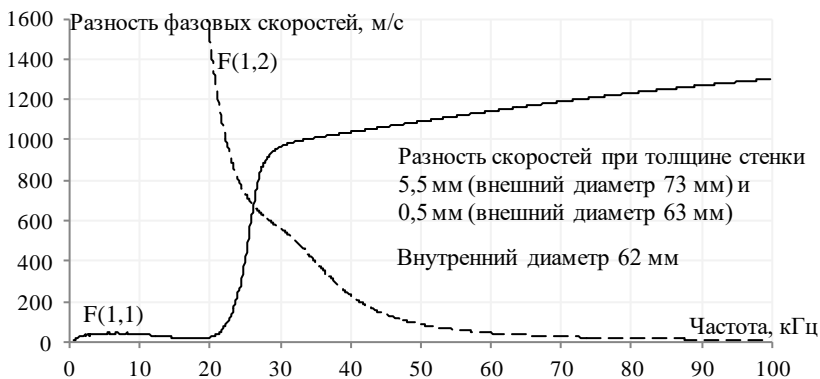


Рис. 6. Зависимость фазовой скорости от частоты при изменении толщины стенки трубы

На рис. 7 представлено изменение модуля относительной амплитуды смещений компонент изгибной волны в зависимости от частоты. Наибольшие смещения по амплитуде имеет азимутальная составляющая, при этом имеется локальный максимум на частоте 15 кГц. Радиальная и



продольная компоненты имеют амплитуды смещений на порядок и полтора порядка меньше соответственно.

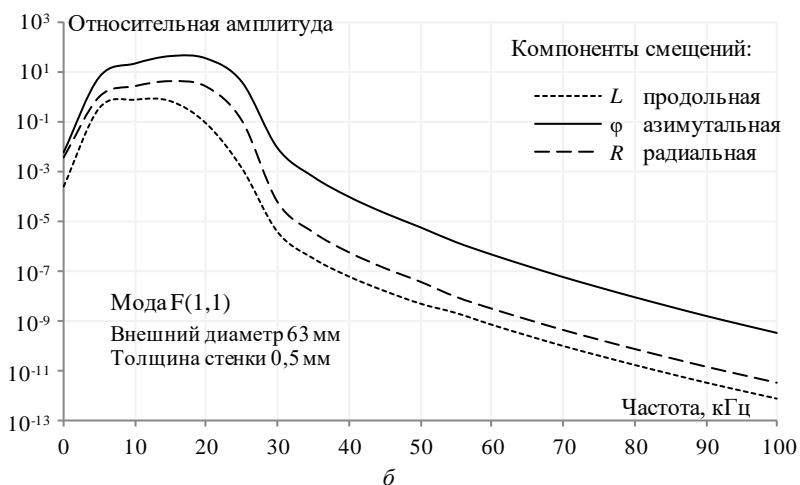
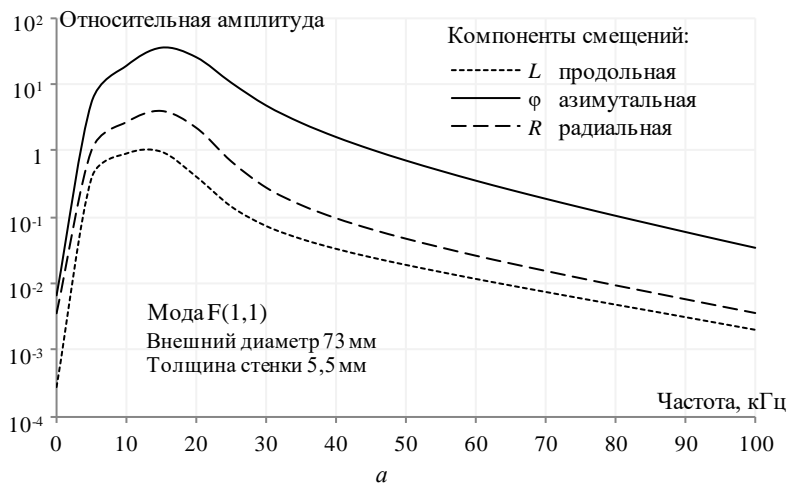


Рис. 7. Изменение относительной амплитуды смещений компонент изгибной волны в зависимости от частоты

Поскольку наибольшая разность фазовой и групповой скорости изгибной волны (в частности, моды  $F(1,1)$ , рис. 5, 6) при различной толщине стенки трубы с внутренним диаметром 62 мм достигается на час-

тоте 25 кГц и выше, то с учетом изменения амплитуды компонент упругих смещений (рис. 7) для определения толщины стенки целесообразно использовать частоты в пределах от 30 до 50 кГц.

Амплитуда компонент смещений изгибной волны моды  $F(1,1)$  с частоты 15 кГц начинает уменьшаться (рис. 7) и с 30 кГц переходит в экспоненциально убывающую зависимость, что делает низкоэффективным использование данной моды на высоких частотах.

Использование моды  $F(1,2)$  для определения толщины стенки наиболее эффективно на низких частотах – менее 60 кГц, но при этом необходимо учитывать области частот, где разность групповой скорости незначительна: около частот 23 и 33 кГц. Таким образом, оптимальный диапазон используемых частот моды  $F(1,2)$  составляет от 20 до 60 кГц.

### Экспериментальные исследования

Поскольку излучающие преобразователи устанавливались таким образом, что максимальные азимутальные компоненты касательных напряжений были сосредоточены при 90 и 270 градусах (рис. 2, а), то согласно эпюре смещений изгибной волны (рис. 8, пунктирная и штриховая линии) радиальные и продольные компоненты были сосредоточены при углах 0 и 180 градусов.

Высокая амплитуда принятого сигнала при 0 и 180 градусах объясняется конструктивными особенностями пьезоэлектрического преобразователя, поскольку прямой пьезоэффект при работе пластины на растяжение-сжатие (радиальная компонента) давал более высокую амплитуду электрического сигнала по сравнению с работой пластины на изгиб (продольная и азимутальная компоненты).

Таким образом, с учетом особенностей возбуждения и приема изгибной волны при ее использовании для измерения толщины стенки трубы существует необходимость выделения компонент смещения с демпфированием или ослаблением мешающих и неиспользуемых компонент смещений, что, в свою очередь, требует изготовления специализированных преобразователей. Особенным также является наличие посторонних мод крутильной и продольной волны при любой конфигурации и конструкции преобразователей, что необходимо учитывать при проектировании преобразователей изгибных волн.

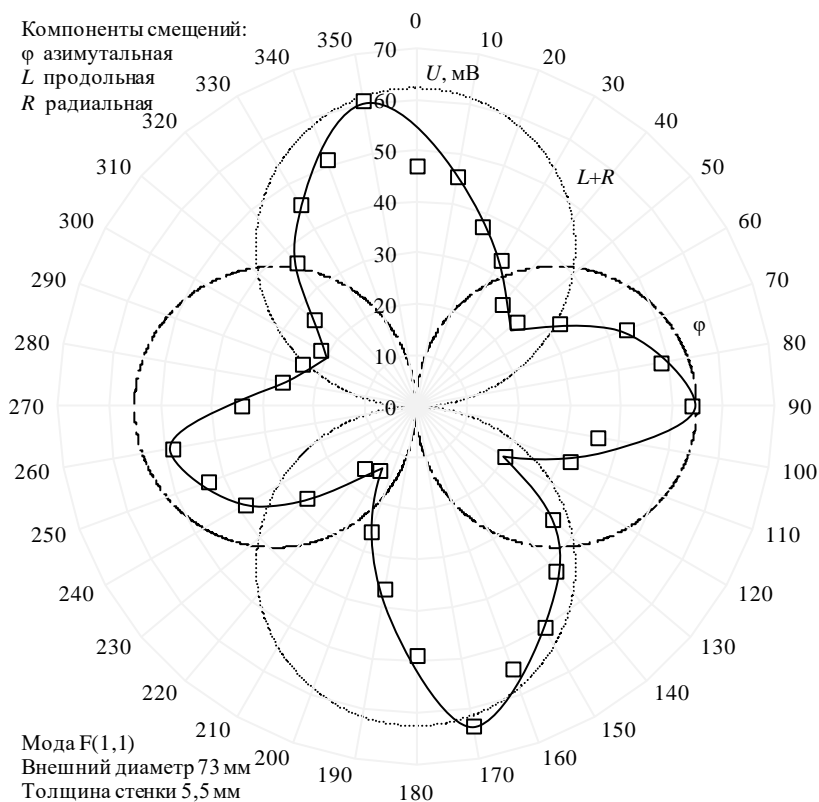


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды от угла, соответствующего развертке трубы по периметру

При исследовании скорости распространения изгибной волны моды  $F(1,1)$  на частоте 11,4 кГц в зависимости от точки приема на цилиндрической поверхности трубы установлено, что существенных изменений по скорости не наблюдается (рис. 9). Скорость волны изменяется в пределах  $2124 \pm 6$  м/с. Таким образом, можно полагать, что скорость изгибной волны в любой точке на цилиндрической поверхности трубы не зависит от координаты по азимуту (по огибающей).

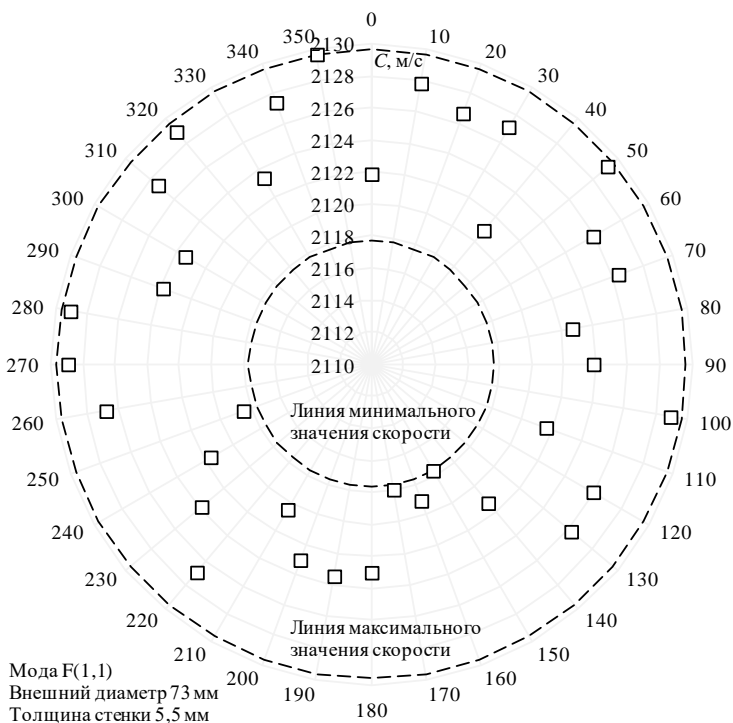


Рис. 9. Зависимость скорости от угла  $\theta$ , соответствующего развертке трубы по периметру

## Выводы

По результатам исследований по оценке возможности применения изгибной волны для измерения толщины стенки можно сделать следующие выводы:

- для применения изгибной волны при измерении толщины стенки необходимо знать дисперсионные зависимости исследуемых труб, исходя из которых выбирать рабочую частоту преобразователей;
- для исследуемой трубы с внутренним диаметром 62 мм рабочая частота преобразователя может лежать от 25 кГц и выше;
- на частоте 30 кГц и выше эффективность возбуждения и приема изгибной волны моды  $F(1,1)$  в трубе с внутренним диаметром 62 мм уменьшается по экспоненте;

– для выделения компонент смещений из эпоры смещений изгибной волны необходимо изготовление специализированных преобразователей;

– скорость распространения изгибной волны моды  $F(1,1)$  в трубе с внешним диаметром 73 мм и толщиной стенки 5,5 мм на частоте 11,4 кГц не претерпевает существенных изменений и лежит в диапазоне от 2118 до 2130 м/с.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем для контроля толщины стенки трубы волноводным методом на основе возбуждения и приема изгибной волны.

### Список литературы

1. Kirby, R. On the scattering of longitudinal elastic waves from axisymmetric defects in coated pipes / R. Kirby, Z. Zlatev, P. Mudge // Journal of Sound and Vibration. – 2013. – Vol. 332, no. 20. – Pp. 5040–5058.
2. Kirby, R. On the scattering of torsional elastic waves from axisymmetric defects in coated pipes / R. Kirby, Z. Zlatev, P. Mudge // Journal of Sound and Vibration. – 2012. – Vol. 331, no. 17. – Pp. 3989–4004.
3. Inspection of pipelines using the first longitudinal guided wave mode / P. S. Lowe, R. Sanderson, S. K. Pedram, N. V. Boulgouris, P. Mudge // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 70. – Pp. 338–342.
4. Luo, W. Phased array focusing with guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder / W. Luo, J. L. Rose // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2007. – Vol. 121, no. 4. – Pp. 1945–1955.
5. Na, W. B. Wave-attenuation estimation in fluid-filled steel pipes: The first longitudinal guided wave mode / W. B. Na, H. S. Yoon // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2007. – Vol. 43, no. 8. – Pp. 549–554.
6. Sun, Z. Flexural, longitudinal and torsional mode natural focusing phenomena in a pipe / Z. Sun, L. Zhang, J. L. Rose // AIP Conference Proceedings. – 2004. – Vol. 700, no. 1. – Pp. 193–197.
7. The reflection of fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes / A. Demma, P. Cawley, M. J. S. Lowe, A. G. Roosenbrand // Journal of Acoustic Society of America. – 2003. – Vol. 114, no. 3. – Pp. 611–625.
8. EMAT pipe inspection technique using higher mode torsional guided wave  $T(0,2)$  / Nurmalia, N. Nakamura, H. Ogi, M. Hirao // NDT & E International. – 2017. – Vol. 87. – Pp. 78–84.
9. Kwun, H. Long-range guided wave inspection of structures using the magnetostrictive sensor / H. Kwun, S. Y. Kim, G. Light // Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing. – 2001. – Vol. 21, no. 4. – Pp. 383–390.
10. Alleyne, D. N. The choice of torsional or longitudinal excitation in guided wave pipe inspection / D. N. Alleyne, T. Vogt, P. Cawley // Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. – 2009. – Vol. 51, no. 7. – Pp. 373–377.

11. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 3–8.
12. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 58–66.
13. *Муравьева, О. В.* Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, С. А. Мурашов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2011. – № 2. – С. 149–154.
14. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2016. – № 2. – С. 33–41.
15. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4 (66). – С. 55–60.
16. Guided wave flexural mode tuning and focusing for pipe testing / J. L. Rose, Z. Sun, P. J. Mudge, M. J. Avioli // *Materials Evaluation*. – 2003. – Vol. 61, no. 2. – Pp. 162–167.
17. Ultrasonic guided wave flexural mode tuning for limited access pipe inspection / J. L. Rose, J. Li, X. Zhao, M. J. Quarry // *AIP Conference Proceedings*. – 2001. – Vol. 557, no. 1. – Pp. 164–171.
18. *Sun, Z.* Flexural torsional guided wave mechanics and focusing in pipe / Z. Sun, L. Zhang, J. L. Rose // *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2005. – Vol. 127, no. 4. – Pp. 471–478.
19. *Tang, L.* Excitation mechanism of flexural-guided wave modes  $F(1,2)$  and  $F(1,3)$  in pipes / L. Tang, B. Wu // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2017. – Vol. 36, no. 3. – P. 59. – 11 p.
20. Scattering of torsional flexural guided waves from circular holes and crack-like defects in hollow cylinders / X. Zhang, Z. Tang, F. Lv, K. Yang // *NDT & E International*. – 2017. – Vol. 89. – Pp. 56–66.
21. Analysis of flexural mode focusing by a semianalytical finite element method / T. Hayashi, K. Kawashima, Z. Sun, J. L. Rose // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2003. – Vol. 113, no. 3. – Pp. 1241–1248.
22. *Norris, A. N.* Scattering of flexural waves on thin plates / A. N. Norris, C. Vemula // *Journal of sound and vibration*. – 1995. – Vol. 181, no. 1. – Pp. 115–125.
23. *Vemula, C.* Flexural wave propagation and scattering on thin plates using Mindlin theory / C. Vemula, A. N. Norris // *Wave motion*. – 1997. – Vol. 26, no. 1. – Pp. 1–12.
24. *Myshkin, Y. V.* Influence of the viscoelastic media properties on the lowest Lamb wave mode propagation in pipe / Y. V. Myshkin, O. V. Muravieva // *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2015 : Paper book of the I International Forum (November 25–27, 2015, Russia)*. – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. – Pp. 152–156.
25. *Myshkin, Y. V.* The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes / Y. V. Myshkin, O. V. Muravieva // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 881, no. 1. – 12 p.

26. Baltazar, A. Study of wave propagation in a multiwire cable to determine structural damage / A. Baltazar, C. D. Hernandez-Salazar, B. Manzaneres-Martinez // NDT & E International. – 2010. – Vol. 43, no. 8. – Pp. 726–732.

27. Damage detection in ACSR cables based on ultrasonic guided waves / R. Mijarez, A. Baltazar, J. Rodriguez, J. Ramirez-Niño // Dyna. – 2014. – Vol. 81, no. 186. – Pp. 226–233.

28. Schaal, C. Crack detection in multi-wire cables using guided ultrasonic waves / C. Schaal, L. Gaul // EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2014. – Pp. 2028–2035.

29. Rucka, M. Experimental and numerical studies of guided wave damage detection in bars with structural discontinuities // Archive of Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 80, no. 12. – Pp. 1371–1390.

30. Pavlakovic, B. N. High-frequency low-loss ultrasonic modes in imbedded bars / B. N. Pavlakovic, M. J. S. Lowe, P. Cawley // Journal of Applied Mechanics. – 2001. – Vol. 68, no. 1. – Pp. 67–75.

31. Shin, H. J. Guided wave tuning principles for defect detection in tubing / H. J. Shin, J. L. Rose // Journal of Nondestructive Evaluation. – 1998. – Vol. 17, no. 1. – Pp. 27–36.

32. Chree, C. Longitudinal vibrations of a circular bar // The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics. – 1886. – Vol. 21. – Pp. 287–298.

33. Chree, C. The equations of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates, their solutions and applications // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. – 1889. – Vol. 14. – Pp. 250–309.

34. Pochhammer, L. Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner Schwingungen in einem unbegrenzten isotropen Kreiscylinder // Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1876. – Vol. 81. – Pp. 324–336.

*Yu. V. Myshkin*, major lecturer

*O. V. Murav'eva*, DCs in engineering, professor

*A. A. Fotina*, magister student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Justification of the Use of Flexural Wave to Estimate the Wall Thickness of Pipe**

*The theory of determining the wall thickness of a pipe based on the determination of the difference in the velocity of propagation of a flexural wave is presented. The dependences of the propagation velocity of the flexural wave of the  $F(1,1)$  and  $F(1,2)$  modes are presented, for example, which the possibility of realizing a technique for determining the pipe wall thickness over a certain frequency range is shown.*

**Keywords:** flexural wave, guided wave testing, pipe, dispersion.

УДК 615.47:616-073

*А. И. Назмутдинова*, канд. техн. наук, науч. сотр.

*В. Н. Милич*, канд. техн. наук, зав. отд.

E-mail: lssm@ftiudm.ru

ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф.

*Ю. С. Дудина*, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Е. П. Кузнецов*, канд. мед. наук, врач ультразвуковой диагностики

БУЗ УР «ГКБ №2 МЗ УР», г. Ижевск

## **Возможности применения вейвлет-преобразования при обработке ультразвуковых изображений**

*Статья посвящена обработке ультразвуковых изображений щитовидной железы, полученных на разных частотах: 5, 6, 7,5 и 10 МГц. Представлены результаты исследования признаков изображения, разработанных для анализа трудноразличимых объектов на основе применения вейвлет-преобразования. Получены результаты, показывающие перспективность использования вейвлет-признаков для диагностики заболевания щитовидной железы по ее ультразвуковым изображениям.*

**Ключевые слова:** ультразвуковые изображения, вейвлет-преобразование, мультичастотность, щитовидная железа, диагностика заболеваний.

### **Введение**

Ультразвуковое исследование (УЗИ) является важнейшим способом диагностики заболеваний сердца, сосудов, внутренних органов и эндокринных желез [1]. Анализ ультразвуковых изображений, как правило, сводится к визуальному осмотру экспертом, в то время как современные технологии позволяют обрабатывать цифровые изображения автоматически. В современном ультразвуковом оборудовании уже используются некоторые методы цифровой фильтрации [2]. Однако этого не всегда достаточно для диагностики заболеваний.

Таким образом, существует необходимость в разработке методов обработки ультразвуковых изображений с целью выявления аномалий. В настоящей работе исследуются мультичастотные ультразвуковые изображения щитовидной железы.



### Постановка задачи

Ультразвуковые приборы позволяют получать изображения на разных частотах. Как правило, врач-диагност выбирает одну частоту в зависимости от конкретного случая. Известно, что чем выше частота, тем короче длина волны и тем меньше глубина исследования [2]. В зависимости от исследуемого органа и телосложения пациента выбирается та или иная частота для УЗИ. В настоящем исследовании предполагается, что использование изображения сразу на нескольких частотах может позволить получить информацию, которой нет на отдельном изображении или которую невозможно получить по отдельному изображению.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы продемонстрировать перспективность мультичастотной вейвлет-обработки изображений. В настоящей работе для этой цели используются классификационные признаки, основанные на вейвлет-преобразовании, которые ранее были разработаны для классификации трудноразличимых объектов по многозональным космическим снимкам и снимкам с беспилотных летательных аппаратов [3].

Вейвлет-преобразование позволяет разложить исходное изображение на 1-м уровне преобразования на 4 других: А – изображение аппроксимации, Г, В, Д – изображения горизонтальных, вертикальных и диагональных деталей соответственно. Такие изображения далее мы называем изображениями ДВП или матрицами ДВП. Одно из основных преимуществ вейвлет-преобразования заключается в способности описывать сигнал в двух областях – пространственной и частотной [4], что позволяет получать информативные признаки для задач классификации.

### Решение задачи

Были рассмотрены УЗИ-изображения трех пациентов (рис. 1): *a* – здоровый, *b* – пациент с аутоиммунным тиреоидитом; *в* – пациент, в правой доле щитовидной железы которого наблюдается узел. Для каждого из трех случаев получены изображения на 4 частотах: 5, 6, 7,5 и 10 МГц. На рис. 1 представлены снимки УЗИ при частоте 10 МГц.

Ко всем изображениям с целью улучшения визуального восприятия была применена процедура нерезкого маскирования, а также медианная фильтрация [5]. Затем каждые 4 разночастотных изображения для отдельного пациента были совмещены с использованием афинного преобразования в среде MapInfo.

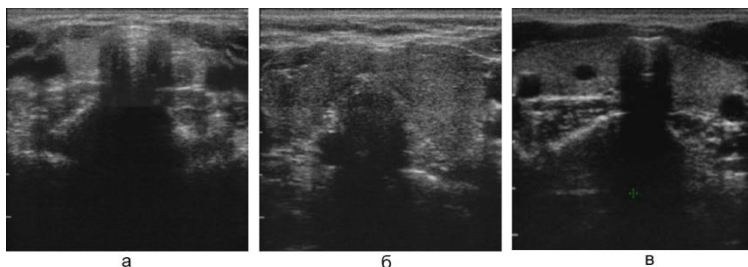


Рис. 1. Изображения УЗИ на частоте 10 МГц щитовидной железы для трех типов пациентов: *а* – здоровый; *б* – аутоиммунный тиреоидит; *в* – узел в правой доле

Для исследования были выбраны небольшие фрагменты в левой доле щитовидной железы каждого пациента размером  $512 \times 512$  пикселей ( $1 \times 1 \text{ см}^2$ ). Размеры фрагментов обусловлены использованием вейвлет-преобразования. К каждому выбранному фрагменту применено вейвлет-преобразование Хаара, по результатам которого были вычислены признаки, разработанные для классификации трудноразличимых объектов [3] и приведенные в таблице.

#### Предложенные признаки, основанные на вейвлет-преобразовании

Группа признаков	Описание	Количество признаков
1	– Среднее значение по матрицам ДВП – Стандартное отклонение по матрицам ДВП	8
2	Количество коэффициентов вейвлет-разложения: – превышающих среднее значение – превышающих 0,75 от среднего значения – превышающих 1,25 от среднего значения – меньше 0,25 от среднего значения – значения которых меньше 0	20
3	– Количество пиков – Средняя площадь пиков – Площадь максимального пика	12

Признаки рассчитываются для каждого изображения ДВП, полученного в результате вейвлет-преобразования. Все признаки разделены на три группы. В первой группе – статистические характеристики. Во вторую и третью группу входят признаки, рассчитываемые по результатам бинарного представления матриц ДВП. Третья группа признаков включает в себя характеристики пиков, где под пиками понимаются сплош-

ные участки единиц в бинарном представлении, полученном с использованием порога, равного среднему значению коэффициентов вейвлет-разложения матрицы ДВП.

### Результаты и их обсуждение

В результате анализа экспериментальных графиков зависимости значений предложенных вейвлет-признаков от частоты ультразвуковой волны выявлена особенность, на основе которой может быть построен индикатор наличия аутоиммунного тиреоидита. На рис. 2 представлены графики значений признака «стандартное отклонение для изображения аппроксимации» для трех типов пациентов. Графики здорового пациента и пациента с узлом имеют одинаковую форму, но отличаются по высоте. Это может быть связано с настройками аппаратуры, которые врач ультразвуковой диагностики подбирает для каждого отдельного пациента (яркость, контраст). Форма графика, соответствующего пациенту с аутоиммунным тиреоидитом, отличается от двух других. Отсутствие изломов при переходе от частоты к частоте может быть описано с использованием формулы конечно-разностной аппроксимации второй производной, согласно которой значение второй производной функции  $y$  в точке  $x_i$  вычисляется следующим образом:

$$y''(x_i) = \frac{y_{i-1} - 2 * y_i + y_{i+1}}{h^2},$$

где  $y_i$  – значение функции  $y$  в точке  $x_i$ ,  $h = x_i - x_{i-1}$  – шаг разбиения. В нашем случае шагом  $h$  выступает разность между соседними частотами, которая не является постоянной. Однако в силу особенностей решаемой задачи сделаем допущение о том, что шаг  $h = 1$ . Тогда в качестве индикатора наличия аутоиммунного тиреоидита рассмотрим показатель, рассчитываемый по формуле

$$f = astd_5 - 2 * astd_6 + astd_{7,5}, \quad (1)$$

где  $astd_5$ ,  $astd_6$  и  $astd_{7,5}$  – значения признака «стандартное отклонение по изображению аппроксимации», рассчитанное для ультразвуковых изображений с частотами 5, 6 и 7,5 МГц соответственно.

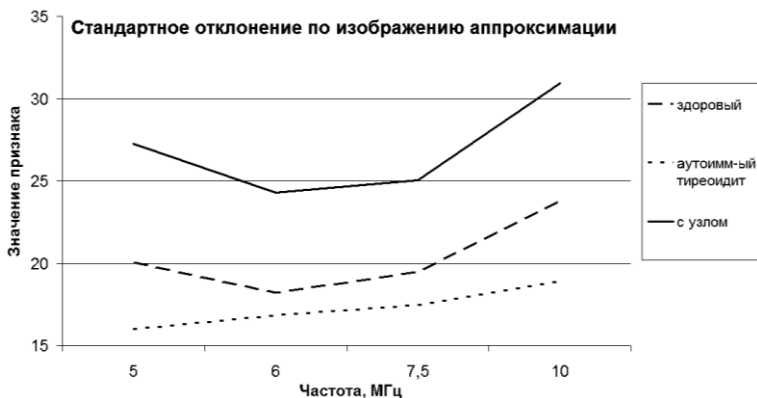


Рис. 2. Графики изменения значений признака «стандартное отклонение по изображению аппроксимации» в зависимости от частоты ультразвуковой волны для трех типов пациентов

Рассчитаем значения предложенного индикатора (1) для трех типов пациентов. Получим, что для здорового пациента  $f \approx 3,1$ , для пациента, в правой доле которого наблюдается узел,  $f \approx 3,8$ , для пациента с аутоиммунным тиреоидитом получено значение  $f \approx 0,3$ . Таким образом, индикатор  $f$  для пациента с диагнозом аутоиммунный тиреоидит значительно ниже, чем для двух других. Этот индикатор должен быть в дальнейшем протестирован на большом наборе данных, включающем в себя пациентов с различными диагнозами. После этого можно будет говорить об эффективности индикатора. Однако продемонстрированный случай показывает перспективность использования мультисотного метода поиска аномалий на УЗИ-изображениях щитовидной железы и применения для этого признаков, основанных на вейвлет-преобразовании.

## Выводы

В результате исследования вейвлет-признаков для трех типов пациентов выявлен индикатор, который демонстрирует возможность дифференцирования изображений щитовидной железы с аутоиммунным тиреоидитом от изображений здоровой щитовидной железы.

### Список литературы

1. Хофер, М. Ультразвуковая диагностика. Базовый курс. – М. : Мед. лит., 2006. – 104 с.
2. Осипов, Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы. Режимы, методы и технологии. – М. : Изомед, 2011. – 316 с.
3. Назмутдинова, А. И. Исследование зависимости результатов классификации многозональных изображений лесной растительности от параметров вейвлет-преобразования / А. И. Назмутдинова, В. Н. Милич // Автометрия. – 2016. – № 3 (52). – С. 20–27.
4. Короновский, А. А. Непрерывный вейвлет-анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – М. : Физматлит, 2003. – 176 с.
5. Исследование методов удаления спекл-шумов на ультразвуковых изображениях / А. Бобкова, С. Поршнев, В. Зюзин, В. Бобков // Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision Control Engineering, Russia, Vladivostok, September 16–20, 2013. – Pp. 244–246.

A. I. Nazmutdinova, CSc in engineering, researcher  
V. N. Milich, CSc in engineering, head of department  
E-mail: lssm@ftiudm.ru

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

O. V. Murav'eva, DSc in engineering, professor

J. S. Dudina, postgraduate student

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

E. P. Kuznetsov, CSc in medicine, doctor of ultrasound diagnostics

City Clinical Hospital No. 2, Izhevsk, Russian Federation

### The Possibilities of Wavelet-Transform Application to Ultrasonic Images Processing

*The article is dedicated to problem of processing of the ultrasound images of thyroid obtained for different frequencies: 5, 6, 7,5 and 10 (MHz). The results of study of the image features developed for the analysis of the difficult-to-distinguish objects and based on the wavelet-transform are presented. The results demonstrating the prospects of the wavelet-transform using for diagnosis of the thyroid diseases by ultrasound images are obtained.*

**Keywords:** ultrasonic images, wavelet-transformation, multifrequency, thyroid, diseases diagnosis.

УДК 620.179.16

*К. В. Петров*, аспирант

*О. В. Муравьева*, д-р техн. наук, проф.

*В. А. Зорин*, аспирант

*А. Ф. Башарова*, магистрант

*Г. Л. Федорова*, магистрант

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Влияние растягивающих напряжений на скорости рэлеевской и поперечной акустических волн в стальных цилиндрических объектах**

*В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния растягивающих напряжений в областях упругости, пропорциональности и пластичности на скорости рэлеевской и поперечной волн для цилиндрических образцов стали 40Х. Рассчитаны коэффициенты акустоупругости.*

**Ключевые слова:** ультразвук, поперечная волна, рэлеевская волна, растягивающие напряжения.

### **Введение**

Многие протяженные изделия из пруткового проката, например насосные штанги, испытывают в процессе эксплуатации растягивающие (сжимающие) нагрузки. Наличие растягивающих напряжений в таких изделиях может привести к накоплению повреждений, что в свою очередь влияет на эксплуатационные характеристики и срок службы изделия. Среди различных методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния материала выделяют акустический метод, ввиду его относительной дешевизны, надежности и безопасности [1–8], и методы магнитной стратиграфии [9–11].

Применение ультразвука для оценки растягивающих напряжений основано на эффекте акустоупругости, заключающемся во взаимосвязи механических напряжений и скорости распространения акустических волн. С его помощью можно определить поле механических напряже-

---

© Петров К. В., Муравьева О. В., Зорин В. А., Башарова А. Ф., Федорова Г. Л., 2018

Работа выполнена в рамках проекта № 3.5705.2017/ВУ по государственному заданию Министерство образования и науки РФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2017–2019 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

ний в элементах конструкции и сделать вывод об их близости к критическим.

В отличие от методов диагностики, использующих электромагнитные свойства металлов, метод акустоупругости стандартизован именно как метод контроля внутренних механических напряжений. Магнитный метод также имеет ряд некоторых недостатков по сравнению с акустическим методом: значительная погрешность определения величины механических напряжений в металле при упругих и упругопластических деформациях, зависимость результатов измерений от геометрических размеров объекта контроля и скорости перемещения контролируемого изделия. Несмотря на то, что рентгеновский метод позволяет определять напряжение в деталях сложной формы, неограниченных размеров, исследовать напряжения на очень малых участках поверхности образца, определять мгновенные напряжения в объектах, подвергающихся периодическим нагрузкам, он имеет пониженную точность при контроле крупнозернистых материалов, также не позволяет проводить контроль в нескольких точках.

### **Используемые подходы**

Целью работы является исследование влияния растягивающей одноосной нагрузки образцов из конструкционной легированной стали 40Х на скорость акустических волн. Сталь 40Х применяется для изготовления валов, штоков, коленчатых и кулачковых валов, реек и других деталей повышенной прочности.

Для определения скоростей упругих волн использован метод на многократных отражениях с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) принципа возбуждения-приема акустических волн [12–14]. Использование ЭМА-метода обусловлено его высокой чувствительностью, воспроизводимостью результатов контроля и точностью определения скорости распространения акустических волн [15–17].

Для реализации экспериментальных исследований подготовлены два образца из стали 40Х, размеры которых приведены на рис. 1.

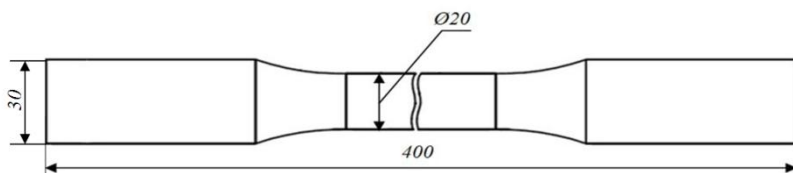


Рис. 1. Образец из стали 40X

Механические свойства стали 40X при закалке 840 °С в масле и отпуске 580 °С на воздухе приведены в табл. 1.

Таблица 1. Механические свойства стали 40X

Параметры	Значение
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	635
Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	440
Относительное удлинение при разрыве $\delta_5$ , %	16
Ударная вязкость КСУ, Дж/м <sup>2</sup>	59

Испытания на растяжение металлических образцов проводились с помощью испытательной машины Instron 300DX. Образцы нагружались поступательно с шагом 20 кН до достижения нагрузки в 100 кН, а далее с шагом 10 кН до достижения предела текучести, после чего разгружались с тем же шагом. На рис. 2 представлена экспериментальная установка, а также схема распространения волн по прутку и их поляризация.

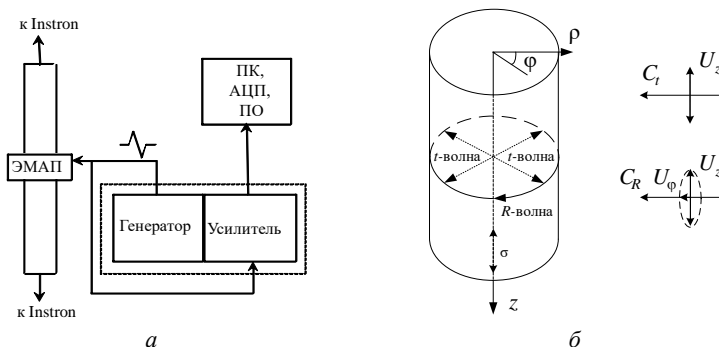


Рис. 2. Схема нагружения образцов и регистрации (а), принятая система координат и поляризация используемых волн (б)



Поляризация поперечных волн  $U_{\perp}$ , распространяющихся в радиальных направлениях по сечению прутка, направлена вдоль направления нагружения. Рэлеевские волны, распространяющиеся по периметру прутка, имеют эллиптическую поляризацию. В эксперименте для возбуждения и приема поперечной волны использовался разъемный проходной ЭМА-преобразователь поперечной волны [18] и накладной ЭМА-преобразователь рэлеевской волны. Для регистрации и дальнейшей обработки полученной серии многократных отражений использовалось программное обеспечение *Принц* (рис. 3) [19].

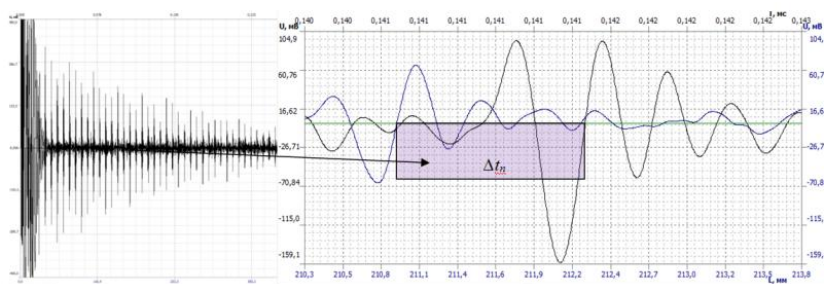


Рис. 3. Характерная осциллограмма серии многократных отражений поперечной волны по диаметру прутка со смещением по временной оси импульсов без нагрузки и при нагрузке 624 МПа на 18-м отражении

## Результаты и обсуждение

Скорости поперечных и рэлеевских волн рассчитывались по следующим формулам:

$$C_t = \frac{D \cdot n}{t_n}, \quad C_R = \frac{\pi D \cdot n}{t_n}, \quad (1)$$

где  $D$  – среднее значение диаметра при нагружении;  $n$  – номер отражения;  $t_n$  – время  $n$ -го видимого отражения без нагрузки.

На рис. 4, *a* представлены результаты измерения среднего диаметра образца при нагружении, согласно которому начало зоны пластичности соответствует значению  $\sigma_{0,2} = 420$  МПа (относительная деформация  $\varepsilon_{xx} = 0,018$  %) для первого образца, и  $\sigma_{0,2} = 448$  МПа ( $\varepsilon_{xx} = 0,019$ ) для второго образца.

На рис. 4, *б* и 5, *б* приведены графики относительного изменения скорости поперечной и рэлеевской волн в процессе нагружения ( $C_0$  – скорость волны в прутке без нагружения).

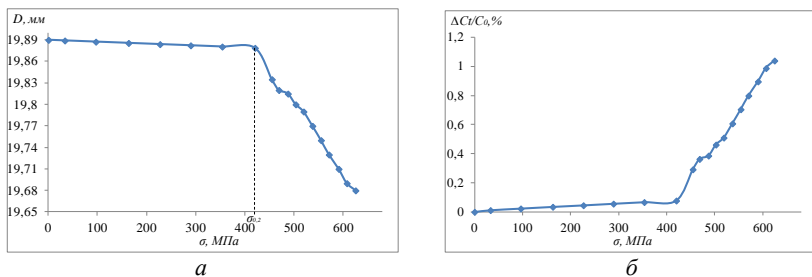


Рис. 4. Зависимость диаметра образца (а) и относительного изменения скорости поперечной волны (б) от нагружения

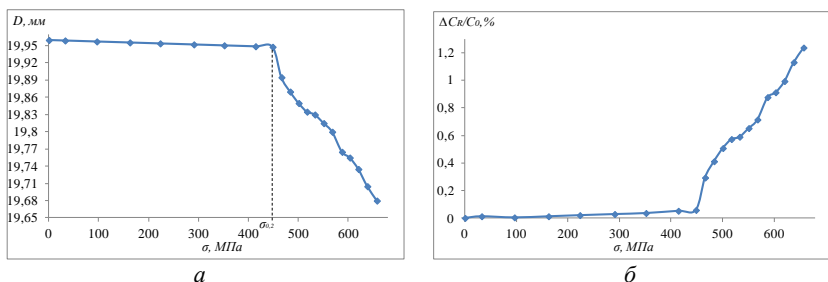


Рис. 5. Зависимость диаметра образца (а) и относительного изменения скорости рэлеевской волны (б) от нагружения

Степень влияния напряжений  $\sigma$  на скорость поперечной и рэлеевской волн можно оценить по коэффициентам акустоупругой связи, рассчитываемым как:

$$\beta_{zz}^C = \frac{\Delta C_t}{C_{t0} \cdot \sigma_{zz}}, \quad (3)$$

$$\beta_{z\varphi}^C = \frac{\Delta C_R}{C_{R0} \cdot \sigma_{zz}}, \quad (4)$$

где  $\Delta C/C_0$  – относительное изменение скорости при нагружении,  $\sigma$  – прикладываемая нагрузка.

В области упругих деформаций наблюдается наименьшее изменение скоростей упругих волн и соответственно минимальное значение коэф-

фициента акустоупругости. При переходе в область текучести наблюдается резкое изменение скоростей волн и увеличение коэффициента акустоупругости.

Расчитанные значения коэффициентов акустоупругости в различных областях нагружения представлены в табл. 2. Для обоих типов волн наблюдаются схожие значения коэффициентов в соответствующих областях деформации.

Таблица 2 Коэффициент акустоупругости  $\beta$ , 1/ГПа

Для поперечной волны		Для рэлеевской волны	
Область упругой деформации	Область текучести	Область упругой деформации	Область текучести
0,0018	0,034	0,0013	0,016

## Выводы

Таким образом, в работе исследована зависимость скорости акустических волн от механических напряжений в стали 40Х. Показано, что с увеличением напряжений в направлении поляризации акустической волны наблюдается изменение скорости волн. Наибольшее изменение скорости происходит при напряжениях, соответствующих области пропорциональности и области текучести, о чем свидетельствует большее значение коэффициента акустоупругости для данных областей.

## Список литературы

1. Об использовании акустической антенной решетки для контроля термopовреждений аустенитной стали спектральным методом / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, С. Н. Пичков, Д. Н. Шишулин // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 42–48.
2. Влияние отрицательных температур и поврежденности на акустические характеристики сплава АМГ6 / А. В. Гончар, В. В. Мишакин, В. А. Клошников, К. В. Курашкин, С. А. Сорокина // Дефектоскопия. – 2017. – № 4. – С. 66–70.
3. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных соединений углеродистых сталей после различных режимов тепловложения акустическим методом / А. Н. Смирнов, В. Л. Князьков, Н. В. Абабков, Е. А. Ожиганов, Н. А. Конева, Н. А. Попова // Дефектоскопия. – 2018. – № 1. – С. 40–46.
4. Motova, Ye. A. Experimental investigation by ultrasound of engineering materials behavior under the cyclic loading / Ye. A. Motova, N. Ye. Nikitina // Materials Physics and Science. – 2016. – Vol. 28, no. 1–2. – Pp. 43–47.
5. Никитина, Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород : ТАЛАН, 2005. – 208 с.

6. *Ivanova, Y.* Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile / *Y. Ivanova, T. Partalin, D. Pashkuleva* // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, no. 1. – Pp. 39–50.

7. *Леньков, С. В.* Резонансный электромагнитно-акустический метод измерения вязкоупругих свойств аморфных ферромагнитных лент, подвергнутых низкотемпературному отжигу / *С. В. Леньков, Н. В. Федорова* // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 8. – С. 800–806.

8. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации высокохромистой стали / *С. А. Баранникова, А. В. Бочкарёва, А. Г. Лунёв, Г. В. Шляхова, Л. Б. Зуев* // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2016. – № 59 (8). – С. 558–564.

9. Структура и механические свойства высокоуглеродистой стали, подвергнутой интенсивному деформационному воздействию / *Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, Л. С. Горулева, А. В. Макаров, Н. Л. Печеркина* // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 10. – С. 1055–1065.

10. *Кулеев, В. Г.* Влияние необратимых переходов доменных границ в пластически деформированных сталях на их остаточную намагниченность / *В. Г. Кулеев, Т. П. Царькова, Е. Ю. Сажина* // Дефектоскопия. – 2016. – № 12. – С. 73–81.

11. Особенности изменения полезного сигнала магнитного анизометра при повороте приставного датчика / *В. А. Захаров, С. М. Молин, С. В. Леньков, В. А. Колясев* // Дефектоскопия. – 2018. – № 11. – С. 47–51.

12. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40X со скоростью объемных и рэлеевских волн / *В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров* // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

13. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / *О. В. Муравьева, В. А. Зорин* // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

14. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / *О. В. Муравьева, М. Ю. Соков* // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

15. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / *В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов* // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

16. *Бабкин, С. Э.* Измерение скорости звука с помощью меандрового электромагнитно-акустического преобразователя // Инженерная физика. – 2017. – № 1. – С. 50–54.

17. *Муравьев, В. В.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / *В. В. Муравьев, К. А. Тапков* // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 263–270.

18. Пат. 179018 Российская Федерация, МПК В 06 В 1/02 (2006.01), Н 04 R 1/00 (2006.01), G 01 N 29/00 (2006.01). Электромагнитно-акустический преобразователь / *О. В. Муравьева, К. В. Петров*. – № 2017141861 ; заявл. 30.11.2017 ; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 12.

19. *Муравьев, В. В.* Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 572–577.

*K. V. Petrov*, postgraduate student

*O. V. Murav'eva*, DSc in engineering, professor

*V. A. Zorin*, postgraduate student

*A. F. Basharova*, magister student

*G. L. Federova*, magister student

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Influence of Tensile Stress on Rayleigh Wave and Transverse Wave Velocities in Cylindrical Steel Object**

*The paper presents the results of an experimental study of the influence of tensile stresses in elastic and plastic deformation regions on the velocity of Rayleigh and transverse waves in cylindrical objects made of 40H steel. The acoustoelastic coefficients were also calculated.*

**Keywords:** ultrasound, transverse wave, Rayleigh wave, tensile stress.

УДК 620.179.16+534.22

*В. А. Стрижак*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: str@istu.ru

*Р. Р. Хасанов*, аспирант

E-mail: beif@mail.ru

*С. С. Мкртчян*, магистрант

E-mail: sergsmile@yandex.ru

*К. Г. Шорников*, магистрант

E-mail: emelkosta@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Оценка производительности акустического метода структуроскопии арматуры из композитных материалов**

*Представлен вариант методики структуроскопии образцов композитной арматуры длиной 100 м акустическим волноводным методом. Произведена оценка производительности стенда структуроскопии. Приведены результаты опробования методики.*

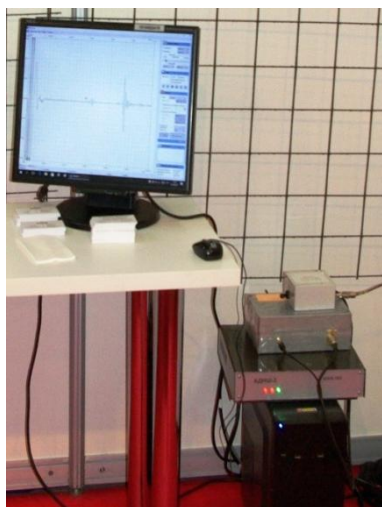
**Ключевые слова:** структуроскопия, акустический неразрушающий контроль, волноводный метод, композитная арматура.

### **Введение**

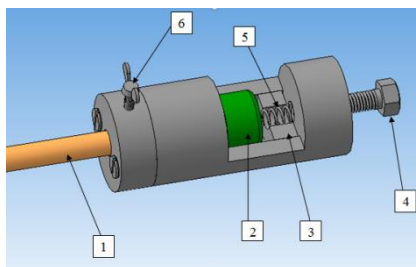
Бурное развитие рынка композитных материалов, в частности композитной арматуры, осложнено отсутствием эффективной системы контроля качества продукции при огромном числе мелких производителей [1]. Невысокая величина начальных затрат по организации производства изделий из композитных материалов ведет к расширению списка мелких производителей, не обремененных заботой о качестве продукции.

### **Метод контроля**

Разработанный комплекс (рис. 1, *а*) структуроскопии и дефектоскопии композитной арматуры на базе дефектоскопов АДНШ/АДНКТ реализует технологию волноводного контроля протяженных объектов, длина которых многократно превышает размеры поперечных сечений [2–4]. Для решения задачи структуроскопии композитной арматуры существующим пьезопреобразователем (датчиком) [5, 6], работающим в совмещенном режиме (излучение и прием), разработано переходное устройство (рис. 1, *б*), фиксирующее датчик на конце прутка.



а



б

Рис. 1. Комплекс структуроскопии и дефектоскопии композитной арматуры: внешний вид (а); метод фиксации пьезоэлектрического датчика на прутке (б): 1 – композитная арматура; 2 – пьезоэлектрический датчик; 3 – ограничитель; 4 – болт фиксации усилия прижима датчика к торцу объекта контроля; 5 – пружина; 6 – винт фиксации объекта контроля

Для оценки структуры прутков композитной арматуры была использована методика, основанная на определении величин скорости стержневой ультразвуковой волны, обладающей малой дисперсией скорости, проходящей по телу прутка [7]. Скорость стержневой  $C_{S0}$  волны зависит от свойств материала и определяется формулой

$$C_{S0} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность материала объекта.

Для оценки скорости ультразвуковой волны с использованием дефектоскопа АДНШ/АДНКТ измеряется время прихода первого донного импульса на эхограмме многократных отражений. Скорость ультразвуковой волны рассчитана по формуле (2) исходя из того, что сигнал излучается и принимается одним и тем же датчиком, т. е. проходит удвоенную длину объекта контроля [8, 9]:

$$C = \frac{2L}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

где  $C$  – скорость ультразвука в объекте;  $t_1$  – время начала зондирующего импульса;  $t_2$  – время начала первого донного импульса;  $L$  – длина объекта контроля.

### Оценка производительности

Благодаря отсутствию потерь на расхождение, указанные волны ослабляются лишь за счет затухания в материале объекта контроля [10]. Для оценки максимальной производительности метода структуроскопии, произведено прозвучивание стержневой волной образцов композитной арматуры длиной 100 м [11]. На производительность комплекса влияют как ограничения подсистемы ввода информации, так и ограничения производительности программных расчетных модулей [12].

На рис. 2 представлена эхограмма, полученная при контроле стоемтового прутка на максимальной чувствительности дефектоскопа АДНШ с использованием усреднения 16 [13–15].

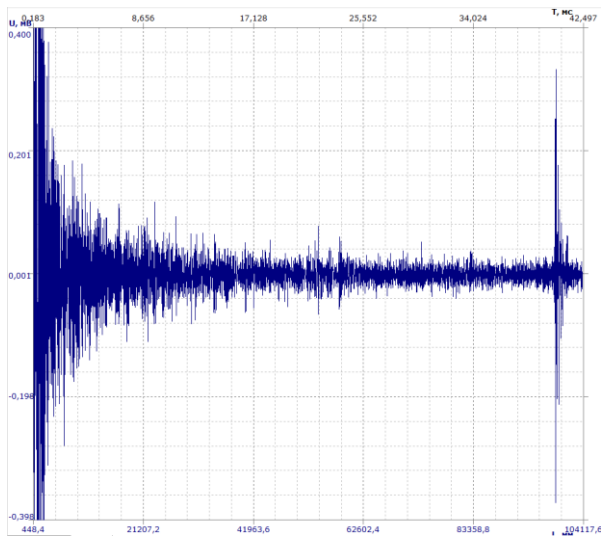


Рис. 2. Эхограмма прутка длиной 100 м при усреднении 16

Общее время измерения без учета времени установки датчика на прутки составило 17 с. Предварительно смотанный в бухту прутки с



условным диаметром 8 мм перед измерением был развернут и расположен на ровной поверхности без изгибов. Видимый в центре незначительный всплеск сигнала вызван неровностью поверхности [16, 17]. С правой стороны эхограммы виден донный импульс, превышающий уровень шумов в 10 раз, что позволяет эффективно идентифицировать донный импульс для целей структуроскопии (определения скорости стержневой волны), но не позволяет проводить дефектоскопию прутка. Полученное значение скорости стержневой волны составило 4967 м/с.

Опробование методики проведено на прутках композитной арматуры с условным диаметром 8, 10 и 12 мм. Измерения проводились многократно, при различных параметрах системы регистрации (частота дискретизации – 1 и 2 МГц, без усреднения и с усреднением – 8) при установке датчика с разных сторон прутка. Результаты получены при пакетной обработке файлов с набором настроечных характеристик (рис. 3).

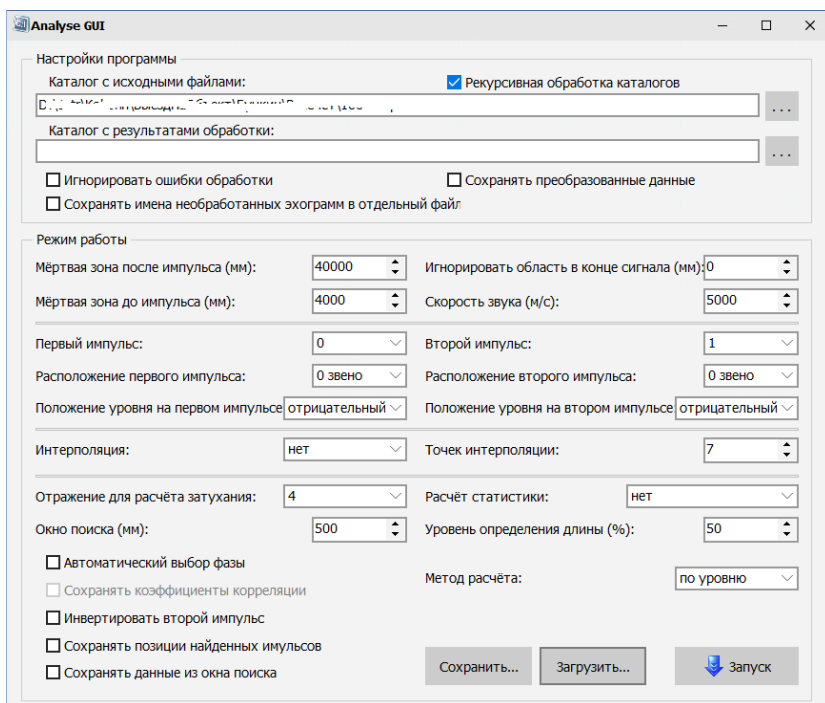


Рис. 3. Параметры программной среды обработки эхограмм

Результаты измерений скоростей в 55 прутках композитной арматуры приведены в таблице.

### Результаты измерений скоростей

Параметры	Диаметр арматуры		
	10 мм	12 мм	8 мм
Количество измерений	27	32	5
Среднее значение скорости	4953	4906	4974
Мин	4946	4899	4969
Мах	4957	4911	4977
Стандартное отклонение $\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$	2,2	1,8	2,5

По результатам измерения скоростей видно, что диаметр арматуры не значительно влияет на скорость распространения стержневой волны, среднее отклонение скорости от диаметра прутка составляет 25 м/с при максимальной погрешности измерения 2,5 м/с. Таким образом, система показала высокую стабильность и точность.

Продемонстрированная возможность контроля прутков композитной арматуры на этапе между изготовлением и упаковкой в бухту позволяет оценить производительность метода контроля с учетом времени установки датчика (14 с) – 3,3 м/с (200 м/мин) [18, 19]. Столь высокая производительность метода удовлетворяет потребность в сплошном контроле прутков композитной арматуры при наличии 28 станков по ее изготовлению. В случае структуроскопии прутков длиной 10 м производительность составит 1600 прутков в смену 8 ч или 0,55 м/с (33 м/мин).

### Вывод

Производительность метода структуроскопии на основании скорости стержневой волны на прутках длиной 100 м составляет 3,3 м/с (200 м/мин), на прутках длиной 10 м производительность составит 0,55 м/с (33 м/мин).

Среднее отклонение определения скорости стержневой волны в композитной арматуре не более 2,5 м/с (0,05 %).

Среднее значение скорости распространения стержневых волн в композитной арматуре на исследованных образцах с условными диаметрами 8 мм, 10 мм и 12 мм не выходит за пределы 4900 м/с.

### Список литературы

1. Степанов, В. Ф. Арматура композитная полимерная / В. Ф. Степанов, А. Ю. Степанов, Е. П. Жирков. – М. : Бумажник, 2013. – 200 с.
2. Импульсный метод измерения скорости ультразвука / Г. А. Буденков, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Г. А. Полянкин, Я. Ю. Коршунов, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1998. – № 9. – С. 3–8.
3. Сучков, Г. М. Современные возможности ЭМА-дефектоскопии [Электронный ресурс] // Средства неразрушающего контроля [Сайт]. – URL: [http://defektoskopia.narod.ru/articles/acoustics/modern\\_defect.htm](http://defektoskopia.narod.ru/articles/acoustics/modern_defect.htm) (дата обращения: 20.06.2018).
4. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М. : Машиностроение, 2004. – 864 с.
5. Злобин, Д. В. Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д. В. Злобин, О. В. Муравьева. // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2012. – № 4. – С. 99–104.
6. Стрижак, В. А. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.
7. Muraviev, V. V. The influence of internal stress and structural state in wires on the basic characteristics of pohhammer's waves / V. V. Muraviev, O. V. Korobeynikova, A. V. Platonov // 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Abstracts. – 2010. – Pp. 121–122.
8. Эффективность использования стержневых и крутильных волн для контроля пруткового проката / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 3–8.
9. Поля смещений в волнах, излучаемых изгибными колебаниями пластин / Г. А. Буденков, Е. Г. Булатова, О. В. Недзвецкая, В. А. Стрижак // Дефектоскопия. – 2000. – № 6. – С. 54–63.
10. 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. – С. 149–154.
11. Леньков, С. В. Определение частоты дискретизации и длительности реализации при цифровом спектральном анализе конечных реализаций сигналов // Вестник ИжГТУ. – 2006. – № 1. – С. 49–52.
12. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 173–178.
13. Акустическая дефектоскопия прутков с использованием многократных отражений / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Б. А. Буденков, Т. Н. Лебедева, Д. В. Злобин // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 50–55.

14. *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.

15. Measuring sound velocities and anisotropy of microstructural units of laminate composite materials by microacoustical technique / S. Liu, E. Guo, V. M. Levin, Yu. S. Petronyk // Arnold, W., Hirsekorn, S. (eds.) Acoustical Imaging. – Vol. 27. – Dordrecht : Springer, 2004. – Pp. 137–141.

16. *Муравьева, О. В.* Влияние регулярных перепадов сечения на контролепригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 41–49.

17. *Буденков, Г. А.* Основные закономерности взаимодействия волн Похгаммера с дефектами / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 33–46.

18. Imaging of carbon-fiber-reinforced (CFR) laminates microstructure by acoustic microscopy techniques / S. Liu, E. Guo, V. M. Levin, Yu. S. Petronyuk // Arnold, W., Hirsekorn, S. (eds.) Acoustical Imaging. – Vol. 27. – Dordrecht : Springer, 2004. – Pp. 156–162.

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

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

E-mail: str@istu.ru

R. R. Khasanov, postgraduate student

E-mail: beif@mail.ru

S. S. Mkrtychyan, magister student

E-mail: sergsmile@yandex.ru

K. G. Shornikov, magister student

E-mail: emelkosta@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Performance Evaluation of the Acoustic Method of Structural States of Reinforcement Made of Composite Materials**

*In the article, a variant technique of structural state testing the composite reinforcement samples with a length of 100 m by an acoustic waveguide method is considered. The performance of the structuroscopy stand was estimated. The results of testing the method are presented.*

**Keywords:** structure inspection, acoustic non-destructive testing, waveguide method, composite reinforcement.

УДК 620.179.16

К. А. Тапков, аспирант  
В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф.,  
зав. кафедрой «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики»  
E-mail: izhjup@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при эксплуатации

*Рассмотрен вопрос влияния температурных напряжений на общее напряженно-деформированное состояние, получено сохранение характера распределения напряжений по элементам рельса при различном значении разницы температуры окружающей среды и температуры закрепления рельса. Приведено описание нагрузок, возникающих при прохождении подвижного состава по рельсу, и проведено моделирование возникающих напряжений. По результатам моделирования при прохождении подвижного состава был выявлен фокус напряжений в подповерхностном слое рельса на глубине 8 мм от поверхности катания.*

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, моделирование, эксплуатация, рельс.

### Введение

В настоящее время вопрос обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожного транспорта имеет всё возрастающую роль среди прочих вопросов эксплуатации. Среди основных причин актуализации этого вопроса можно выделить рост грузо- и пассажиропотока, а также строительство высокоскоростных железнодорожных магистралей. Очевидно, что существенный вклад в безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта вносит надежность рельсов. Присутствие в них критических дефектов может привести к их разрушению, вследствие чего возникает аварийная ситуация [1, 2].

Среди играющих значимую роль причин разрушения рельсов (как и многих металлических изделий) необходимо выделить высокие значения остаточных напряжений. Такие напряжения в области дефектов особенно высоки [3–5]. Так, например, в области трещин значения могут достигать предела текучести материала, что значительно снижает срок службы рельсов [4–6].

Вследствие вышеперечисленных факторов появляется необходимость контроля наличия дефектов в уже уложенных путях, что в настоящее время выполняется установками АВИКОН-11 и РДМ-22 [4, 6]. При наличии дефекта возникает необходимость дифференциации дефектов на острodefектные, требующие незамедлительного устранения (замены рельса), и рельсы, замену которых представляется возможным провести через некоторый определенный срок (дефектные рельсы).

С целью определения распределения остаточных напряжений по элементам рельса проведено моделирование уровня напряжений по сечению.

### 1. Нагрузки при прохождении подвижного состава

Во время нагружения рельса со стороны колеса подвижного состава возникают высокие значения контактных напряжений. Вес подвижного состава имеет направление вертикально вниз ( $F_z$ ), что проиллюстрировано на рис. 1. Масса вагона принимается за значение 100 т. В этом случае статическая нагрузка на одно колесо четырехосного вагона составит около 123 кН. Зона контакта представляет собой эллипс с шириной 12,5 и длиной 9,5 мм [5], т. е. имеет площадь 95 мм<sup>2</sup>.

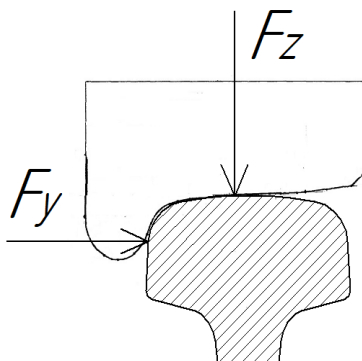


Рис. 1. Прикладываемые нагрузки со стороны подвижного состава

Процесс моделирования проводился для прямолинейных участков рельса, но, несмотря на это, на них все равно присутствует боковая нагрузка  $F_y$ , прикладываемая гребнем колеса при наезде на рельс под некоторым углом. Данная сила может достигать значений в 66 кН [5], что, в свою очередь, сопоставимо с вкладом вертикальной нагрузки.

Очевидно, что в процессе эксплуатации рельса возникает необходимость учета не только статической, но и динамической составляющей.

Согласно [6] значение сил динамического нагружения превосходит статическую силу в 2,6 раза.

## 2. Технологические остаточные напряжения

Остаточные технологические напряжения возникают в процессе производства рельса из-за неравномерности охлаждения элементов рельса, правки и рихтовки.

Значения остаточных напряжений регламентируются ГОСТ 51685–2013 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия», согласно которому в качестве начальных условий для моделирования были приняты критические значения остаточных напряжений. В таком случае продольные составляющие напряжений составят:  $-77$  МПа в головке рельса,  $-125$  МПа в шейке рельса,  $106$  МПа в подошве рельса [7], что проиллюстрировано на рис. 2.

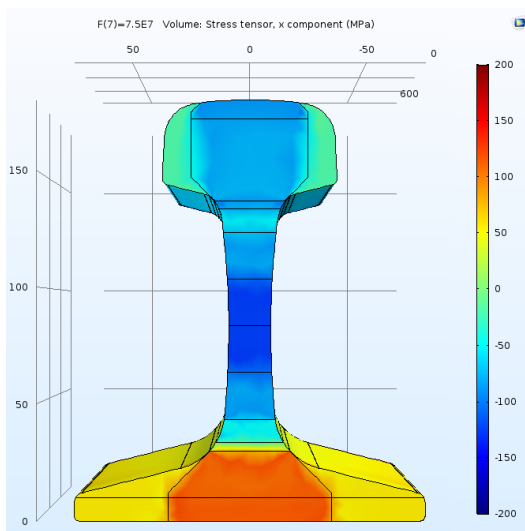


Рис. 2. Распределение остаточных технологических напряжений

## 3. Термические напряжения

К технологическим остаточным напряжениям, возникающим в процессе производства, суммируются напряжения, возникающие вследствие колебаний температуры относительно температуры закрепления рельса. Изменение на  $1$  °C влечет за собой прирост напряжений на  $2,5$  МПа [6]. Результаты моделирования суммарных напряжений по

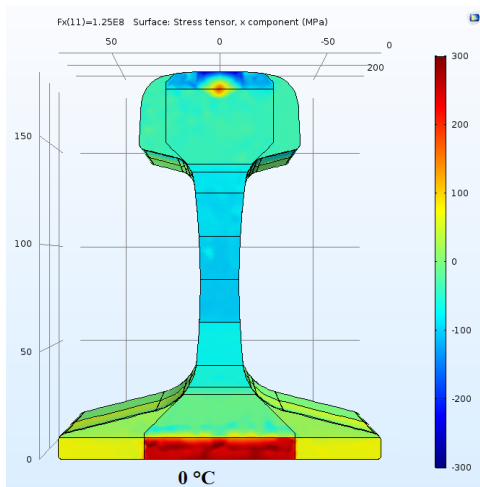
элементам рельса сведены в табл. 1, где  $\Delta T$  – значение разности фактической температуры и температуры закрепления рельса.

**Таблица 1. Значения продольных напряжений в элементах рельса**

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Продольные значения напряжений в элементе, МПа		
	Головка	Шейка	Подошва
+50	-202	-250	-19
+30	-152	-200	31
+10	-102	-150	81
0	-77	-125	106
-10	-52	-100	131
-30	-2	-50	181
-50	48	0	231

#### 4. Результаты моделирования напряжений при прохождении подвижного состава

Результаты моделирования во время прохождения подвижного состава при различных значениях разницы между фактической температурой и температурой закрепления представлены на рис. 3–5. В табл. 2 представлены результаты средних напряжений и напряжений в подповерхностном слое в головке рельса.



*Рис. 3.* Напряжения при прохождении поезда при отсутствии разницы между температурой закрепления и фактической



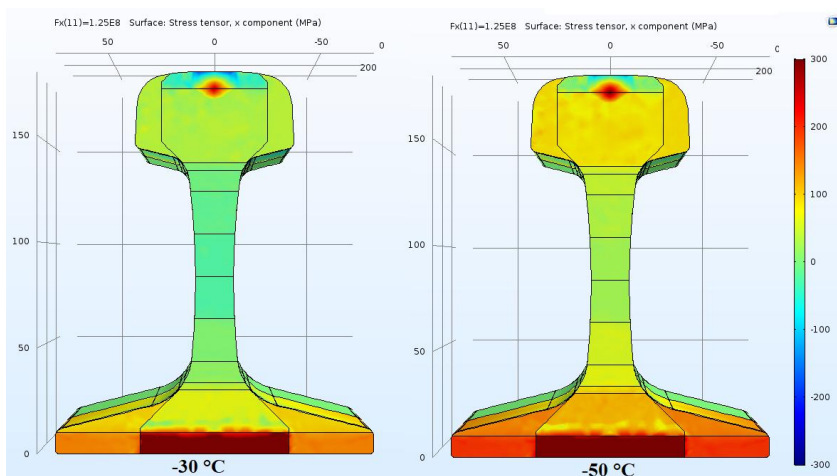


Рис. 4. Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно

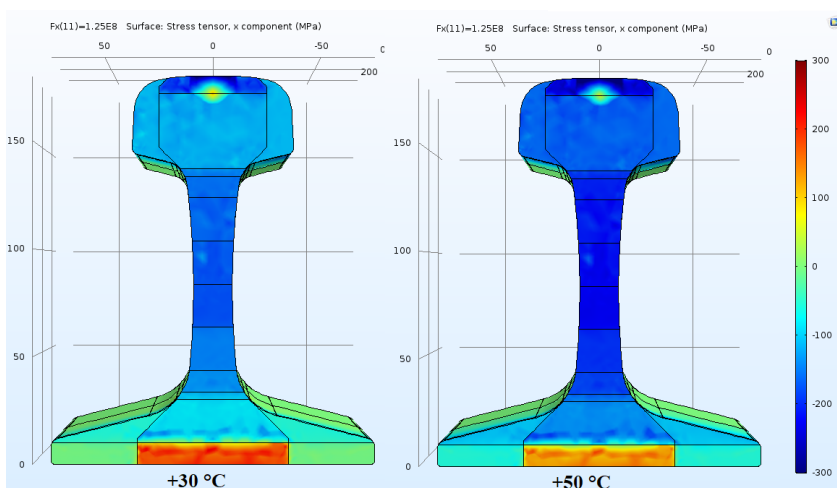


Рис. 5. Напряжения при прохождении поезда при разнице между фактической температурой и температурой закрепления в  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответственно

Таблица 2. Значения напряжений в головке рельса

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Продольные значения напряжений в элементе, МПа	
	Головка	Подповерхностный слой
+50	-202	52
+30	-152	102
+10	-102	157
0	-77	180
-10	-52	204
-30	-2	252
-50	48	310

### 5. Анализ результатов моделирования

Термические напряжения складываются с остаточными технологическими напряжениями, что вызывает сложную картину распределения напряжений, однако при этом следует отметить, что практически при любых значениях разницы между температурой фактической и температурой закрепления сохраняется характер напряжений (растягивающий или сжимающий) по элементам рельса. Исключение составляют напряжения в головке рельса при  $\Delta T = -50^\circ\text{C}$  в головке (48 МПа) и шейке (0 МПа) рельса и напряжения при  $\Delta T = +50^\circ\text{C}$  в подошве рельса (19 МПа).

Результаты моделирования напряжений в продольном направлении при прохождении подвижного состава показали наличие в головке рельса области с растягивающим характером напряжений. Фокус напряжений в головке рельса находится на вертикальной оси симметрии рельса на глубине 8 мм от поверхности катания рельса. При эксплуатации эта область может стать очагом зарождения усталостной трещины [2, 8, 9], наличие дефектов в этой области может вызвать еще большую концентрацию напряжений и, как следствие, повышенную вероятность выхода рельса из строя [10–12].

Полученные результаты моделирования будут в дальнейшем использованы для расчета живучести рельса при наличии в нем дефекта при различных значениях температуры окружающей среды относительно температуры закрепления.

### Выводы

1. При изменении температуры окружающей среды относительно температуры закрепления рельса, несмотря на существенное изменение значений напряжений, сохраняется характер распределения напряжений

по элементам, за исключением  $\Delta T = +50^\circ\text{C}$  для подошвы (19 МПа) и  $\Delta T = -50^\circ\text{C}$  (48 МПа) для головки рельса.

2. В среднем по элементу наибольшие растягивающие напряжения (231 МПа) встречаются в подошве рельса при  $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ . Наибольшие сжимающие напряжения ( $-250$  МПа) встречаются в шейке рельса при  $\Delta T = +50^\circ\text{C}$ .

3. При прохождении подвижного состава в подповерхностном слое на глубине 8 мм по вертикальной оси рельса возникает фокус напряжений, максимальное значение растягивающих напряжений в котором (310 МПа) возникает при  $\Delta T = -50^\circ\text{C}$ . При этом растягивающий характер напряжений в данной области сохраняется при всех рассмотренных значениях  $\Delta T$  (от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ ).

4. При понижении температуры окружающей среды относительно температуры закрепления вырастает риск возникновения усталостных трещин в подошве рельса и в подповерхностном слое на глубине 8 мм от поверхности катания.

### Список литературы

1. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Н. Курбатов, Е. С. Тенилов // Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 7. – С. 103–109.

2. Бехер, С. А. Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации / С. А. Бехер, А. О. Коломеец // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 110–118.

3. Неразрушающий контроль : справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – Т. 4 : в 3 кн. – Кн. 1: Акустическая тензометрия / В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. – М. : Машиностроение, 2004. – 736 с.

4. Неразрушающий контроль рельсов при их эксплуатации и ремонте / А. К. Гурвич, Б. П. Довнар, В. Б. Козлов, Г. А. Круг, Л. И. Кузьмина, А. Н. Матвеев ; под ред. канд. техн. наук А. К. Гурвича. – М. : Транспорт, 1983. – 318 с.

5. Воробьев, А. А. Исследование напряженного состояния пятна контакта колеса и рельса / А. А. Воробьев, П. Г. Сорокин // Новые материалы и технологии в машиностроении : сб. науч. тр. / ред. Е. А. Памфилов. – Вып. 3. – Брянск : БГИТА, 2004. – С. 8–18.

6. Тапков, К. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния дифференцированно термоупрочненных рельсов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 2. – С. 78–83.

7. Муравьев, В. В. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении / В. В. Муравьев, К. А. Тапков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 263–270.

8. *Ботвина, Л. П.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М. : Наука, 2008. – 334 с.

9. *Хибник, Т. А.* Кинетическая диаграмма медленного роста усталостной трещины. Подрастание трещины / Т. А. Хибник, Ю. И. Кольцун // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2011. – № 3 (27). – С. 110–116.

10. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова, Л. В. Гущина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 11–23.

*K. A. Tapkov*, postgraduate student

*V. V. Murav'ev*, DSc in engineering, professor, head of “Instrumentation and Techniques for Measurements, Testing, Diagnostics” department

E-mail: izhjup@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Modeling of the Strain Stress State of the Rail in Use**

*Influence of thermal stresses on the strain stress state of the rail is described in this paper. Also It is shown, that type of stresses (tensile or compressional ones) is the same in elements of the rail even in case of different values of temperature difference. Also there is a description of the stresses that appear in the time of train influence on the rail. Stresses in that situation were calculated by finite-element modeling. According to modeling results it was found the focus of the stresses in sub-surface layer of the rail in the depth of 8 mm under rolling surface.*

**Keywords:** rail, stress-strain state, modeling, rail in use, rail.

---

УДК 629.052.2

*В. А. Широков*, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

E-mail: shirokovva@gmail.com

ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

## **К вопросу создания глобальной гидроакустической системы навигации подводных объектов**

*В работе рассматриваются вопросы создания глобальной гидроакустической пассивной системы подводного позиционирования. Несмотря на простоту идеи триангуляционного позиционирования по сигналам расставленных специальным образом подводных акустических маяков, у реализованных в настоящее время стационарных систем подводного позиционирования размер рабочей зоны ограничивается сотнями метров. Рассматриваются факторы, препятствующие увеличению рабочей зоны позиционирования, и формулируются задачи исследований, направленных на увеличение рабочей зоны до десятков и сотен километров.*

**Ключевые слова:** гидроакустика, позиционирование, подводное, глобальная, навигация.

### **Введение**

Надежное и точное позиционирование объектов в водной среде является одним из ключевых факторов освоения морских глубин как в мирных, так и в военных (оборонных) целях. Особую важность задача подводного позиционирования приобретает с развитием технологий в сферах источников электропитания, преобразователей лучистой и механической энергии в электрическую, а главное – в сфере информационных технологий (ИТ) и искусственного интеллекта (ИИ). Доминантой (трендом) последних лет стал ускоряющийся прогресс в области создания автоматических и автоматизированных (роботизированных) подводных аппаратов, самостоятельно принимающих решения и выполняющих исследовательские и другие задачи либо (информационно, технологически) обеспечивающих эффективную работу управляющего аппаратом человека-оператора.

Инерциальные системы позиционирования, применяемые в течение многих десятилетий, неизбежно накапливают ошибку позиционирования при длительном автономном плавании и поэтому требуют регулярного определения точных координат по известным ориентирам или с применением глобальной спутниковой системы навигации, что дема-

скирует подводный объект [1]. Поэтому в настоящей работе рассматриваются вопросы создания гидроакустической пассивной (не излучающей энергетические потоки) подводной (не требующей всплытия на поверхность для определения координат) системы навигации. Навигация в данной работе будет пониматься как решение задачи определения географических координат.

Разработкой систем подводного позиционирования занимается большое число организаций и исследовательских центров как в России, так и за рубежом. Наиболее известные из них – НПО «Океанприбор», концерн «Моринформсистема-Агат», ФИЦ «Институт прикладной физики Российской академии наук», ИПМТ ДВО РАН во Владивостоке, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, Лаборатория подводной связи и навигации (unavlab.com), а также Istituto Superior Tecnico в Лиссабоне, Университет Джона Хопкинса, Мичиганский, Массачусетский, Пенсильванский и Южно-Калифорнийский университеты США, компания Evologics в Берлине, океанографические институты Scripps в Калифорнии и WHOI в г. Вудс-Холл, океанариум MBARI в г. Монтерей (Мексика) [2].

### **Основные гидроакустические методы подводной навигации**

Метод длинной базы (LBL – long baseline) реализуется путем измерения расстояния до нескольких (не менее трех) акустических маяков, координаты которых известны с высокой точностью, и решения соответствующей системы уравнений. Метод может основываться на измерении времени распространения сигнала от маяков до объекта позиционирования (поиске точки пересечения сфер) или на измерении разностей таких времен (поиске точки пересечения гипербол). В первом случае измеряется время распространения гидроакустического сигнала между объектом позиционирования и маяком (рис. 1). Во втором случае измеряются разности времени распространения сигнала от маяков к объекту позиционирования.

Точность измерения времени распространения сигнала от маяка до подводного объекта может достигать сотых долей процента.

Вариант метода длинной базы – измерение не расстояний до маяков, а направлений (пеленгов) на маяки и последующее решение триангуляционной задачи. Однако точность этого варианта ниже, погрешности позиционирования могут достигать десятков и сотен метров.

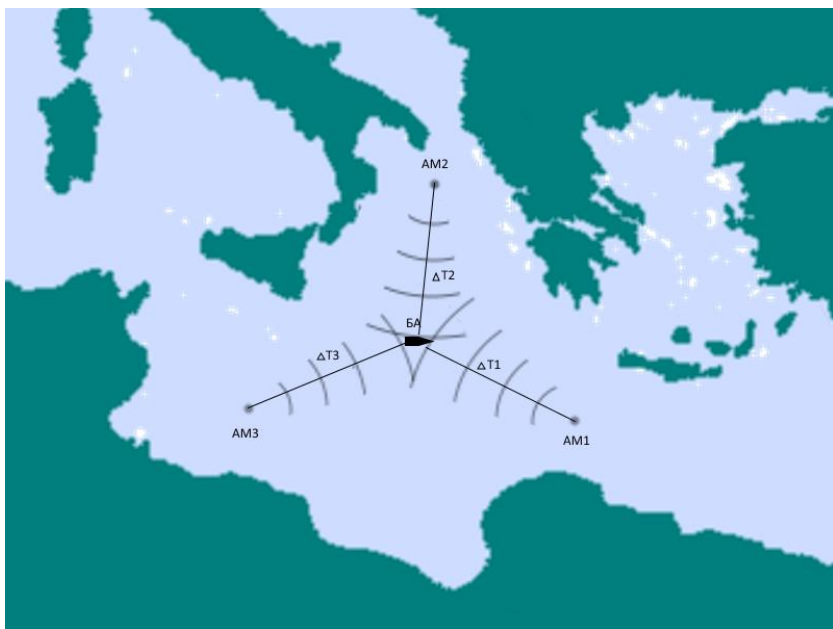


Рис. 1. Иллюстрация метода длинной базы при использовании в качестве акустических маяков АМ1, АМ2, АМ3 акустических излучателей, установленных на дне в точках с известными координатами: БА – беспилотный подводный аппарат

Метод короткой базы (SBL – short baseline) применяется для слежения за перемещением подводного объекта с судна. На подводный объект устанавливается излучатель, а на судно – от трех до восьми приемников, расположение которых определяется с использованием приемника спутниковой навигационной системы.

Метод ультракороткой базы (USBL – ultra short baseline) отличается от метода короткой базы тем, что приемная антенна, состоящая из трех и более приемников, размещается на подводном объекте и принимает сигналы единственного маяка с известными координатами, измеряя вместо разностей времен прихода сигнала на отдельные приемники разности их фаз. В методе ультракороткой базы определяются направление на маяк и дистанция до него. Метод ультракороткой базы применяется преимущественно для осуществления возврата подводного объекта в зону маяка.

Наибольшее применение в реализации гидроакустических систем навигации получил метод длинной базы. Достоинство метода – высокая

точность измерений и сравнительно простые вычислительные алгоритмы, отсутствие необходимости применять сложные акустические антенны на подводном объекте. Во множестве разработаны и применяются компактные навигационные комплексы для небольших подводных объектов, в том числе и беспилотных. Выпускаются удобные и компактные навигаторы для подводных пловцов. Размер рабочей зоны ограничивается пространством расстановки маяков, и обычно не превышает сотен метров – единиц километров, ошибка позиционирования не превышает единиц метров.

В качестве примера можно привести отечественную разработку «RedWave», выполненную в Лаборатории подводной связи и навигации, (Москва)<sup>3</sup>. Навигационный комплекс состоит из четырех навигационных гидроакустических буёв, формирующих длинную навигационную базу, и портативного навигационного приемника, крепящегося на запястье водолаза. Приемник обеспечивает данные о географическом положении и глубине пловца. Заявленная точность позиционирования – 0,84 м.

В работе [3] подробно описана реализация LBL системы позиционирования подводного беспилотного аппарата Virginia Tech Underwater Glider, используемого в целях мониторинга биологических ресурсов.

Фирмой BlueRobotics выпускается даже готовый набор для построения LBL системы подводного позиционирования, включающий подводные маяки, гидромикрофоны, аппаратуру усиления и обработки акустических сигналов, программное обеспечение.<sup>4</sup> Приведенные примеры систем позиционирования имеют радиус покрытия, не превышающий сотен метров.

Увеличение рабочей зоны системы позиционирования от единиц до сотен и тысяч километров ограничивается рядом факторов:

- затуханием звукового поля маяка с расстоянием;
- значительной задержкой прихода звуковой волны от маяка (на расстоянии 100 км задержка прихода акустического сигнала под водой достигает минуты и более);
- фокусировкой звуковой волны маяков в так называемых «звуковых каналах» – слоях воды с меньшей скоростью звука, располагающихся между слоями с большей скоростью звука на глубине сотен метров под поверхностью, причем вариации скорости распространения звука достигают 5 % и более [4, 5];

<sup>3</sup> RedNav. Водолазный навигатор. URL: [http://unavlab.com/ucnl\\_book\\_A42016\\_ru.pdf](http://unavlab.com/ucnl_book_A42016_ru.pdf) (дата обращения: 25.06.2018).

<sup>4</sup> BlueRobotics. URL: <https://www.bluerobotics.com/store/electronics/underwater-gps/aps-wl-11001/> (дата обращения: 25.06.2018).



- переотражением звуковых волн от поверхности и дна, от границ слоев с разной температурой (так называемых «звуковых каналов»);
- маскировкой сигналов маяка множественными источниками звуковых помех;
- частотными искажениями сигналов маяков, проявляющимися при наличии движения водных масс на пути распространения звука (эффект Доплера);
- суточными и сезонными колебаниями скорости распространения звука в воде (изменения температуры и солёности воды в зависимости от солнечной радиации, приливных явлений, погодных явлений и других факторов);
- другими причинами, искажающими результаты измерений звуковых волн от опорных маяков или даже делающими эти измерения невозможными.

При увеличении расстояний между компонентами системы перечисленные факторы увеличивают ошибки определения координат и уменьшают помехозащищенность системы, а главное – значительно увеличивают энергопотребление компонентов и сложность алгоритмов выделения и обработки акустических сигналов. Поэтому построение глобальных (дальнодействующих) систем подводного позиционирования является гораздо более трудоемкой и ресурсоемкой задачей, не решенной на современном уровне развития науки и технологий.

Наиболее известны два проекта, работы по которым начаты на национальном уровне в США и в России. Сведения об этих проектах опубликованы в открытых источниках и не имеют научный характер.

Работы по созданию глобальной океанской системы подводного позиционирования POSYDON (Positioning System for Deep Ocean Navigation) ведутся Управлением перспективных исследовательских проектов Минобороны США (Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA). С помощью подводных маяков, размещенных в точках с известными координатами (рис. 2), предполагается создать возможность подводным объектам определять свое местоположение без всплытия на поверхность.<sup>5</sup>

К работе подключены BAE Systems и ряд ведущих американских университетов, включая Массачусетский технологический институт. Систему Poseidon начнут испытывать не ранее 2018 г.

---

<sup>5</sup> Positioning System for Deep Ocean Navigation (POSYDON). URL: [https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=6797db962e007d18615c3f2e96db42a8&tab=core&\\_cview=1](https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=6797db962e007d18615c3f2e96db42a8&tab=core&_cview=1) (дата обращения: 25.06.2018).

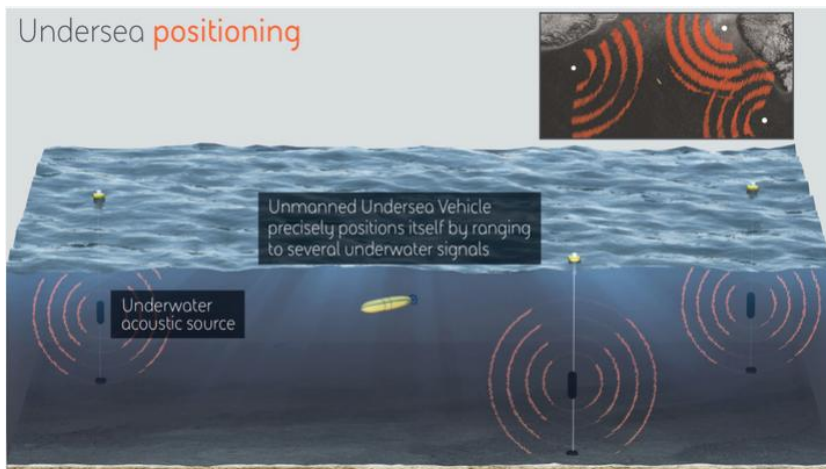


Рис. 2. Размещение гидроакустических маяков системы POSYDON<sup>6</sup>

В России в 2016 г. также было объявлено о проведении концерном «Океанприбор» разработки глобальной морской системы подводного позиционирования «Позиционер». Она поможет подводным беспилотным аппаратам точно определять свое местоположение по донным маякам. В рамках выполнения Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» в 2016 г. была закончена ОКР «Позиционер», в рамках которой был создан опытный образец малогабаритного приборного комплекса (МПК).

МПК «Позиционер» предназначен для уточненного позиционирования подводных объектов в навигационном поле произвольно расставленных гидроакустических маяков-ответчиков.

Однако в комплексе «Позиционер» предусмотрена **двусторонняя** связь подводного аппарата с маяками-ответчиками, что не обеспечивает скрытность подводного аппарата.

Ввиду необходимости значительных вложений в научно-технические исследования и создание технической подводной инфраструктуры оба названных проекта имеют национальный масштаб.

Таким образом, несмотря на свою актуальность, задача создания дальнедействующей, глобальной системы пассивной подводной навигации в настоящее время не решена.

<sup>6</sup> Undersea navigation and positioning system development for U.S. Navy. URL: <https://www.baesystems.com/en-us/article/undersea-navigation-and-positioning-system-development-to-begin-for-u-s-navy> (дата обращения: 25.06.2018).

## Выводы

Создание глобальной (десятки, сотни и тысячи километров) системы глобального подводного позиционирования требует решения множества научных и технических задач, проведения теоретических и экспериментальных исследований, разработки и внедрения новых методов получения, накопления, обработки и интерпретации гидроакустических данных.

Разработка методов увеличения рабочей зоны и точностных характеристик системы позиционирования требует проведения исследований во многих направлениях. Основные из них:

- создание математических и численных моделей среды распространения акустических сигналов маяков;
- разработка и оптимизация, экспериментальное исследование эффективности специальных схем пространственной расстановки маяков;
- создание алгоритмов акустического взаимодействия маяков, решающих задачу непрерывной калибровки параметров покрываемой сеткой маяков гидросферы;
- разработка методов кодирования и фильтрации акустических сигналов.

## Список литературы

1. Дубровин, Ф. С. Исследование некоторых алгоритмов одномаяковой мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний / Ф. С. Дубровин, А. Ф. Щербатюк // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 4 (91). – С. 160–172.
2. Кебкал, К. Г. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов / К. Г. Кебкал, А. И. Машошин // Гироскопия и навигация. – 2016. – № 3 (94). – С. 115–130.
3. Tejaswi, G. Long baseline ranging acoustic positioning system: Master of science in electrical and computer engineering. – Virginia : Blacksbug, 2015. – 121 p.
4. Кацнельсон, Б. Г. Акустика мелкого моря / Б. Г. Кацнельсон, В. Г. Петников. – М. : Наука, 1997. – 191 с.
5. Бабий, В. В. Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.

V. A. Shirokov, CSc in engineering

E-mail: shirokovva@gmail.com

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Aspects of Creating a Global Hydroacoustic Navigation System for Underwater Objects**

*The questions of creation of global hydroacoustic passive system of underwater positioning are considered. Despite the simplicity of the idea of triangulation positioning by the signals of specially placed underwater acoustic beacons, the size of the working area currently implemented for stationary underwater positioning systems is limited to hundreds of meters. The factors that prevent the increase in the working area of positioning are considered, and problems of research aimed at increasing the working area to tens and hundreds of kilometers are formulated.*

**Keywords:** hydroacoustics, positioning, underwater, global, navigation.

УДК 620.179.16+534.22

К. Г. Шорников, студент  
E-mail: emelkosta@gmail.com

Р. Р. Хасанов, аспирант  
E-mail: beif@mail.ru

Ю. В. Мышкин, ст. преп.  
E-mail: mubm@yandex.ru

В. А. Стрижак, канд. техн. наук, доц.  
E-mail: str@istu.ru

С. С. Мкртчян, магистрант  
E-mail: sergsmile@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Моделирование распространения акустических импульсов в композитной арматуре

*Разработана модель распространения акустических импульсов в композитной арматуре. Выявлены зависимости скорости стержневой и крутильной волн от процента армирования, процента отверждения полимера, шага намотки. Результаты моделирования сравнены с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** композитная арматура, стержневая и крутильная волна, процент армирования, процент отверждения полимера, шаг намотки.

### Введение

В последнее время все большее значение уделяется долговечности конструкций и сооружений из железобетона. Долгое время и в настоящий период для армирования бетона применяют металлическую арматуру. Но низкая коррозионная стойкость ограничивает срок эксплуатации железобетонных конструкций. Поэтому была создана полимерная композитная арматура (АКП), которая практически не подвергается коррозии [1–6].

Наряду с появлением новых материалов возникает необходимость их неразрушающего контроля и диагностики для обеспечения техногенной безопасности. Сейчас сложно встретить неразрушающие методы контроля такой арматуры, т. к. это принципиально новый материал, вышедший на рынок относительно недавно. Сложность разработки метода заключается в том, что материал неэлектропроводящий. Это ведет к тому, что большинство видов неразрушающего контроля оказываются бессильными перед композитами. Разработанная в ИжГТУ имени М. Т. Калашникова технология

волноводного контроля линейно-протяженных объектов может быть применима для контроля АКП, т. к. этот метод позволяет контролировать диэлектрики, также он обусловлен высокой производительностью, отсутствием необходимости сканирования, минимальными потерями [7–18].

### Используемые подходы

В программной среде Comsol Multiphysics, которая позволяет рассчитывать акустические поля [19], разработана модель композитной арматуры (рис. 1). В табл. 1 представлены параметры арматуры.

Таблица 1. Входные параметры модели композитной арматуры

Параметр	Значение
Условный диаметр, м	0,008
Длина, м	2,96
Высота витка, м	0,001
Шаг витков, м	0,02
Частота возбуждения импульсов, Гц	25000
Шаг дискретизации по времени, мкс	0,16

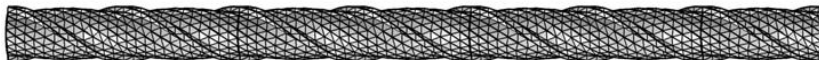


Рис. 1. Модель композитной арматуры

На втором этапе были заданы физико-механические свойства компонентов, входящих в состав АКП. В табл. 2 представлены свойства матрицы и армирующего элемента (волокна). Во всех направлениях модуль упругости был задан согласно формуле [20]:

$$E = E_f \cdot V_f + E_{ep} \cdot V_{ep} + E_l \cdot V_l, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости всего тела;  $E_f$  – модуль упругости стекла;  $E_{ep}$  – модуль упругости смолы;  $E_l$  – модуль упругости не отвержденной смолы;  $V_f, V_{ep}$  и  $V_l$  – объемные доли компонентов соответственно.

Таблица 2. Упругие свойства компонентов

Параметр	Значение
Условный диаметр, м	0,008
Длина, м	2,96
Высота витка, м	0,001
Шаг витков, м	0,02
Частота возбуждения импульсов, Гц	25000
Шаг дискретизации по времени, мкс	0,16

Далее с торца прутка был подан зондирующий импульс в виде силового воздействия в продольном направлении для возбуждения стержневой волны и азимутальном направлении для крутильной волны. Импульс, который описан в [21], представляет синусоиду, затухающую по экспоненте. По полученным эхограммам смещений измерена скорость ультразвуковой волны.

### Результаты и обсуждения

Были проведены исследования зависимости скорости стержневой и крутильной волн от изменения структуры прутка. Изменение структуры подразумевает изменение процента армирования и процента отверждения полимера. Полученные значения средних скоростей стержневой волны занесены в табл. 3. За погрешность определения скорости принято значение ошибки, определяемой шагом дискретизации.

Таблица 3. Значения скоростей стержневой волны

Отверждение полимера, %	Армирование, %					
	70	75	80	85	90	95
	Значение скорости стержневой волны, м/с $\Delta C = 8$ м/с					
100	4809	4970	5120	5268	5411	5552
95	4807	4968	5119	5268	5411	5552
90	4806	4965	5117	5265	5409	5550
85	4805	4962	5115	5265	5409	5550
80	4801	4961	5114	5263	5409	5550

Также были получены значения скоростей крутильной волны от процента армирования при разных процентах отверждения. Результаты занесены в табл. 4.

Таблица 4. Значения скоростей крутильной волны

Отверждение полимера, %	Армирование, %					
	70		70		70	
	Значение скоростей крутильной волны, м/с $\Delta C = 3$ м/с					
100	3049	100	3049	100	3049	100
95	3046	95	3046	95	3046	95
90	3044	90	3044	90	3044	90
85	3042	85	3042	85	3042	85
80	3040	80	3040	80	3040	80

По полученным значениям построены графики зависимости скорости стержневой волны от процента армирования при разных процентах отверждения (рис. 2).

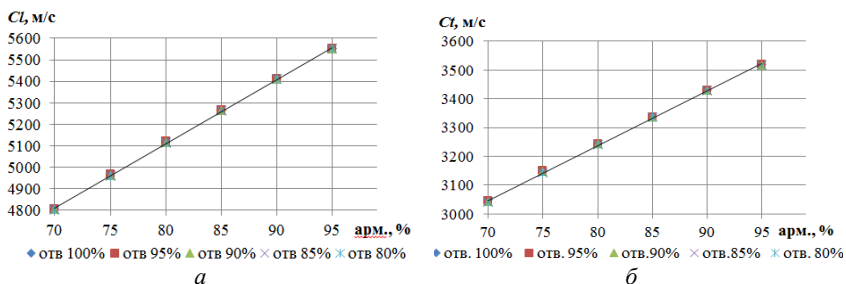


Рис. 2. Графики зависимости скорости стержневой волны от процента армирования при разных процентах отверждения

Из зависимости видно, что рост процента армирования сопровождается линейным увеличением скорости стержневой волны. Максимальная скорость, равная 5552 м/с, наблюдается при проценте армирования 95 %. При проценте армирования 70 % скорость волны минимальна и равна 4801 м/с. Поскольку оказалось, что при варьировании процента отверждения полимера скорость стержневой волны изменяется лишь в пределах ошибки определения скорости, все пять зависимостей легли в одну линию. При увеличении процента армирования скорость крутильной волны также растет линейно. Максимальная скорость, равная 3520 м/с, наблюдается при проценте армирования 95 %. При проценте армирования 70 % скорость волны минимальна и равна 3040 м/с. Процент отверждения также существенно на скорость крутильной волны не влияет.

Далее проведены исследования влияния шага витка на скорости крутильной и стержневой волны. В табл. 5 представлены значения скоростей стержневой волны при вариации шага намотки, где  $C_{11}$ – $C_{15}$  – значения скоростей на 1–5 отражениях,  $C_{1cp}$  – среднее значение скорости стержневой волны.

В табл. 6 представлены значения скоростей крутильной волны при вариации шага намотки.

Таблица 5. Значения скоростей стержневой волны при вариации шага намотки

$V_0$ , мм	$C_{11}$ , м/с	$C_{12}$ м/с	$C_{13}$ м/с	$C_{14}$ м/с	$C_{15}$ м/с	$C_{1cp}$ м/с
10	4839	4840	4832	4840	4840	4839±8
20	4844	4844	4850	4846	4856	4844±8
30	4770	4799	4805	4809	4807	4770±8
40	4815	4823	4822	4823	4831	4815±8
50	4846	4842	4842	4846	4846	4846±8



Таблица 6. Значения скоростей крутильной волны при вариации шага намотки

$V_0$ , мм	$C_{i1}$ , м/с	$C_{i2}$ , м/с	$C_{i3}$ , м/с	$C_{i4}$ , м/с	$C_{i5}$ , м/с	$C_{i\text{ср}}$ , м/с
10	3020	3020	3020	3020	3020	3020±3
20	3035	3035	3035	3035	3035	3035±3
30	3045	3045	3045	3045	3045	3045±3
40	3015	3015	3015	3015	3015	3015±3
50	2987	2987	2987	2987	2987	2987±3

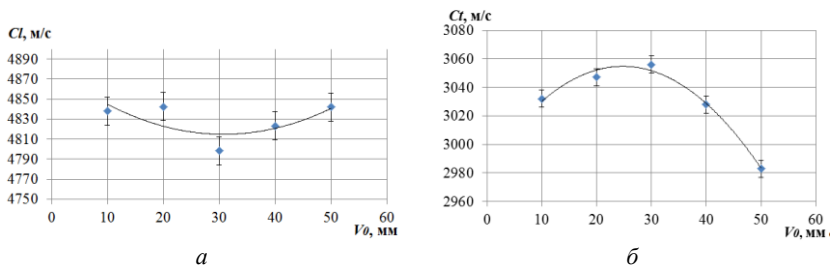


Рис. 3. График зависимости скорости акустической волны от размера шага намотки: а – стрессовая волна; б – крутильная волна

Для проверки результатов моделирования была проведена экспериментальная оценка скорости в композитной арматуре. Опыты были проведены с помощью дефектоскопа АДНШ при реализации волноводного метода. Полученные значения представлены в табл. 7.

Таблица 7. Значения скоростей стержневой и крутильной волн в АКП

Партии прутков	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Физическая характеристика					
% армирования	76,4±0,8	83,9±0,2	79,9±2	88,4±0,05	84,5±0,1
% отверждения полимера	87,230±0,007	96,00±0,04	86,70±0,05	99,575±0,012	99,80±0,02
Скорость стрессовой волны, м/с					
Расчетная	5000±8	5225±8	5105±8	5360±8	5243±8
Измеренная	4810±30	4903±36	4729±44	4983±16	4878±24
Скорость крутильной волны, м/с					
Расчетная	3168±3	3311±3	3234±3	3397±3	3332±3
Измеренная	1809±33	2041±11	1795±69	2192±9	2138±5

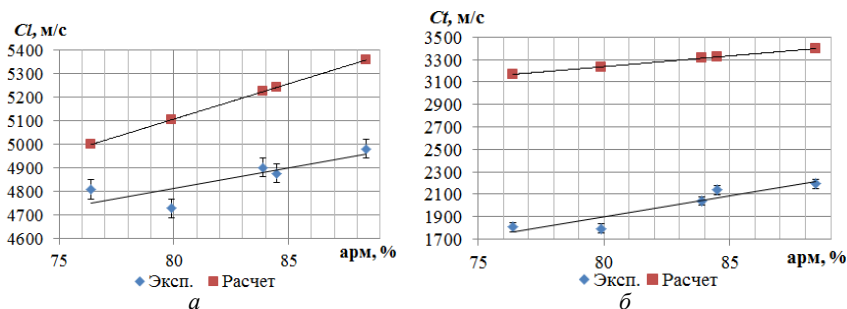


Рис. 4. Графики зависимости скорости стержневой и крутильной волн от процента армирования

По полученным данным построены графики зависимостей стержневой и крутильной волн от процента армирования (рис. 4). Из графика видно, что экспериментальные и расчетные данные имеют одинаковую линейную зависимость роста скорости при увеличении процента армирования, но несколько отличаются значениями. Расчетные данные скорости стержневой волны больше экспериментальных примерно на 200–300 м/с. Для крутильной волны измеренные значения существенно отличаются от расчетных данных. Разница составляет около 1000 м/с.

## Выводы

В результате моделирования выяснилось, что при увеличении процента армирования скорость крутильной и стержневой волн растет линейно. При росте процента отверждения полимера скорость стержневой и крутильной волн также увеличивается линейно. Однако это изменение находится в пределах ошибок определения скорости. Отсюда следует, что данный параметр существенным образом не влияет на скорость УЗ-волны. При варьировании шага витка при фиксированных процентах армирования и отверждения полимера скорость стержневой и крутильной волн изменяется в пределах 1 % от среднего значения.

Из экспериментальных исследований выяснилось, что увеличение процента армирования сопровождается увеличением скорости. Однако значения результатов моделирования несколько превышают результаты экспериментальных исследований. Это можно объяснить тем, что модель представляла собой аморфное тело. Также у каждой партии композитной арматуры физико-механические свойства наполнителя и связующей отличаются. Тогда как в модели они были фиксированными. В связи с этим в дальнейшем требуется разработать более углубленные

подходы к моделированию, в частности более детальному определению структуры, а также конечных физико-механических свойств материала.

### Список литературы

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
2. *Астахов, Ю. В.* Экспериментально-расчетная оценка взаимодействия стальной канатной и стеклопластиковой арматуры с бетоном : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Новосибирск, 2002. – 139 с.
3. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с бетоном / В. Г. Хозин, А. Р. Гизатуллин, А. Н. Куклин, А. А. Пискунов // Известия КГСАУ. – 2013. – № 23. – С. 211–213.
4. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве / А. В. Завгороднев, А. М. Уманский, А. Т. Беккер, Е. К. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн.). Отдельные статьи (спец. вып.). – 2014. – № S4-9. – С. 137–149.
5. Пат. 2461820 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/04 (2006.01). Способ определения прочностных характеристик полимерных композиционных материалов / Генералов А. С., Далин М. А., Мурашов В. В., Бойчук А. С. – № 2011118703/28 ; заявл. 11.05.2011 ; опубл. 20.09.2012, Бюл. № 26.
6. Пат. 2214590 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/00 (2000.01). Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления / Каблов Е. Н., Гуняев Г. М., Карабутов А. А., Мурашов В. В., Пеливанов И. М., Подымова Н. Б., Румянцев А. Ф. – № 2001135020/28 ; заявл. 26.12.2001 ; опубл. 20.10.2003 ; Бюл. № 29.
7. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124.
8. Акустический волноводный контроль элементов глубиннонасосного оборудования / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин, Ю. В. Мышкин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 110–115.
9. *Myshkin, Yu. V.* The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes /, Yu. V. Myshkin, , О. V. Muraveva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881, no. 1. – P. 012019. doi: 10.1088/1742-6596/881/1/012019.
10. *Мкртчян, С. С.* Особенности расчета информативных параметров для волноводного метода акустического контроля / С. С. Мкртчян, С. Е. Михайлов, В. А. Стрижак // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 259–265.

11. Технология акустического волноводного контроля насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 4 (66). – С. 55–60.

12. *Муравьева, О. В.* Влияние регулярных перепадов сечения на контроле-пригодность прутка при контроле акустическим волноводным методом / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 41–49.

13. *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. – С. 149–154.

14. *Мурашов, С. А.* Основные параметры акустического контроля протяженных объектов различного профиля с использованием крутильных волн / С. А. Мурашов, О. В. Коробейникова // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (45). – С. 84–88.

15. *Свиридов, Ю. Б.* Исследование акустического тракта при измерении скорости и затухания ультразвука в тонком стержне / Ю. Б. Свиридов, С. В. Веремеенко // Дефектоскопия. – 1986. – № 6. – С. 24–28.

16. *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.

17. *Муравьев, В. В.* Влияние напряженно-деформированного и структурного состояния в проволоках на основные закономерности распространения стержневой волны Похгаммера / В. В. Муравьев, О. В. Коробейникова, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2009. – № 10. – С. 44–48.

18. *Муравьев, В. В.* Акустическая тензометрия и структуроскопия тонких стальных проволок / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Платунов. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – 108 с.

19. Руководство пользователя COMSOL Multiphysics. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysicsRU.pdf> (дата обращения: 14.04.2018).

20. *Callister, W. D.* Materials science and engineering. An Introduction. – York, USA : John Wiley & Sons, 2007. – 975 p.

21. *Мышкин, Ю. В.* Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю. В. Мышкин, К. В. Петров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 сент. 2017 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – С. 519–529.

*K. G. Shornikov*, student

E-mail: emelkosta@gmail.com

*R. R. Khasanov*, postgraduate student

E-mail: beif@mail.ru

*Yu. V. Myshkin*, senior lecturer

E-mail: mubm@yandex.ru

*V. A. Strizhak*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: str@istu.ru

*S. S. Mkrtchan*, magister student

E-mail: sergsmile@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Modeling of Acoustic Pulses Propagation in Composite Fittings**

*The propagation of acoustic pulses in a composite armature is modeled. The dependences of the rod and torsional waves on the percentage of reinforcement, the percentage of curing of the polymer, the pitch of the winding are determined. The simulation results are compared with the experimental data.*

**Keywords:** composite armature, rod and torsional wave, percent, reinforcement, percentage of polymer curing, winding pitch.

### Секция 3. Физика, радиотехника и связь

УДК 623.416.5:654.94(045)

*М. А. Бояршинов*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: mabkb@istu.ru

*М. Ю. Васильев*, учебный мастер

E-mail: vasm@istu.ru

*А. С. Колотов*, магистрант

E-mail: ankol95@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

#### **Выбор приемопередающих модулей ISM-диапазона для дистанционного управления в мишенном комплексе**

*В статье рассматриваются наиболее подходящие трансиверы, которые можно применить для организации связи в мишенном комплексе. Произведен анализ технических характеристик модулей. Отражены результаты теоретического расчета дальности связи на местности. Произведены испытания с различными типами антенн.*

**Ключевые слова:** мишенный комплекс, приемопередающий модуль, ISM-диапазон, дальность связи, RSSI.

#### **Введение**

Мишенный комплекс предназначен для отработки навыков ведения прицельной стрельбы из неавтоматического и автоматического (в режиме одиночного огня) стрелкового оружия и должен обеспечивать возможность проведения тренировочных стрельб на оборудованных и необорудованных полигонах. Одной из проблем при проектировании подобного рода комплексов является организация связи с мишенями, удаленными друг от друга на достаточно большом расстоянии (до 1000 м включительно). Задача организации связи может быть решена двумя способами: при помощи проводных или же беспроводных интерфейсов. Прокладка кабеля является нерациональным решением. Передача данных по радиоканалу кажется более перспективным направлением.

Одним из важнейших элементов, обеспечивающих дистанционное управление, является приемопередающий модуль.

### **Выбор приемопередающего модуля**

Разрабатываемый комплекс должен обеспечивать дистанционное управление (ДУ) мишенными установками на требуемом расстоянии в пределах прямой видимости, в условиях дождя, тумана, снегопада, запыленности, при скорости ветра до 10 м/с, в том числе порывистого, температуры окружающего воздуха от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха до 100 %. Данные требования обеспечиваются конструкцией устройства и выбором элементной базы.


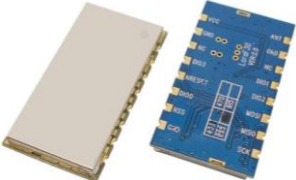


Применение покупных радиомодулей позволяет значительно сократить время разработки и снизить стоимость будущего изделия. К их достоинствам также можно отнести достоверность заявленных характеристик, что может быть доказано проверкой временем и объемом выпуска изделия. В данной статье рассматриваются радиотрансиверы ISM-диапазона, которые не требуют лицензирования на территории РФ при условии соблюдения требований по ширине полосы и излучаемой мощности. В России на основании решений Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) для этих целей выделено несколько таких диапазонов; наиболее часто используемые: диапазон от 433,075 до 434,750 МГц, от 446 до 446,1 МГц, от 868 до 868,2 МГц, а также диапазон от 2400 до 2483,5 МГц. На сегодняшний день существует довольно много фирм, производящих законченные модули трансиверов для беспроводной передачи данных [2].

Основными критериями выбора приёмопередающего модуля ISM-диапазона являлись:

- обеспечение дальности связи до 1000 м;
- наличие интерфейса SPI;
- невысокая стоимость;
- напряжение питания 3,3–5 В.

Перечень наиболее подходящих модулей и их характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики приемопередающих модулей

Приемопередающий модуль	Технические характеристики
 <p data-bbox="210 440 434 464">Anylink DP1276-C433</p>	<p data-bbox="530 280 956 304">Диапазон, МГц ..... 433/868/915</p> <p data-bbox="530 308 956 331">Выходная мощность, мВт ..... 100</p> <p data-bbox="530 335 956 359">Чувствительность, дБ ..... –148</p> <p data-bbox="530 362 956 386">Габариты, мм ..... 22×18</p> <p data-bbox="530 389 956 413">Стоимость, руб. .... 1300</p>
 <p data-bbox="210 663 434 687">NiceRFLoRa1278F30</p>	<p data-bbox="530 512 956 536">Диапазон, МГц ..... 433–460/470–510</p> <p data-bbox="530 539 956 563">Выходная мощность, мВт ..... 1000</p> <p data-bbox="530 566 956 590">Чувствительность, дБ ..... –139</p> <p data-bbox="530 593 956 617">Габариты, мм ..... 38×20</p> <p data-bbox="530 620 956 644">Стоимость, руб. .... 800</p>
 <p data-bbox="154 882 493 906">Hope Microelectronics RFM23BP</p>	<p data-bbox="530 730 956 754">Диапазон, МГц ..... 433/868/915</p> <p data-bbox="530 758 956 782">Выходная мощность, мВт ..... 1000</p> <p data-bbox="530 785 956 809">Чувствительность, дБ ..... –120</p> <p data-bbox="530 812 956 836">Габариты, мм ..... 33×18</p> <p data-bbox="530 839 956 863">Стоимость, руб. .... 550</p>
 <p data-bbox="210 1101 434 1125">EBYTE E19-433M30S</p>	<p data-bbox="530 949 956 973">Диапазон, МГц ..... 410–441</p> <p data-bbox="530 976 956 1000">Выходная мощность, мВт ..... 1000</p> <p data-bbox="530 1003 956 1027">Чувствительность, дБ ..... –138</p> <p data-bbox="530 1031 956 1054">Габариты, мм ..... 37×25</p> <p data-bbox="530 1058 956 1082">Стоимость, руб. .... 700</p>

Представленные модули способны обеспечивать радиосвязь на требуемом расстоянии. Дальность связи по радиоканалу прежде всего зависит от мощности передатчика. Чем мощнее передатчик – тем на большее расстояние можно рассчитывать. Предпочтительнее выбирать трансиверы с максимальной выходной мощностью. Однако требуется учитывать ограничения, связанные со свободным применением частот и излучаемой мощности. Разрешено использовать приемопередатчики с излучаемой мощностью: до 10 мВт для 434 МГц, до 25 мВт для 868 МГц и 0,5 Вт для 446 МГц.



В нашем случае оптимальным приемопередатчиком можно считать модуль от Nore Microelectronics RFM23BP. Он имеет меньшие габариты, оптимальную цену и легко доступен на отечественном рынке.

### Расчет дальности связи на местности

Дальность приема в открытой системе и свободном пространстве приближенно можно оценить по уравнению Фрииса:

$$Pr = Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (1)$$

где  $Pr$  – мощность, полученная от приемной антенны;  $Pt$  – мощность, подаваемая на передающую антенну;  $Gr$  – коэффициент усиления приемной антенны;  $Gt$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $R$  – расстояние;  $\lambda = c/f$  – длина волны;  $c = 299,972458 \times 10^6$  м/с – скорость света в вакууме;  $f$  – частота.

Уравнение (1) описывает уровень сигнала в приемнике относительно выходной мощности передатчика, расстояния, длины волны и коэффициентов усиления антенн. Разность между мощностью полученного сигнала  $Pr$  и чувствительностью приемника называется энергетическим запасом или защитной полосой [1].

Например, мощность, полученная от приемной антенны на расстоянии 1000 м при работе на частоте 446 МГц и значениях  $Pt = 500$  мВт (27 дБм),  $Gr = 0,83$  дБ (взяты из технического руководства на антенну),  $Gt = 0,83$  дБ, рассчитанная по стандартному выражению Фрииса, составляет

$$Pr = 0,5 \cdot 0,83 \cdot 0,83 \cdot \left(\frac{3 \cdot 10^8}{\frac{446 \cdot 10^6}{4\pi \cdot 10^3}}\right)^2 = 9,869 \cdot 10^{-10} \text{ Вт,}$$

что эквивалентно  $-60,057$  дБм.

### Экспериментальная оценка дальности связи на местности

Целью испытаний является оценка дальности передачи данных между радиомодулями, оценка вероятности ошибки передаваемых данных, а также зависимость от типа используемой антенны. Оценка по уравнению Фрииса должна быть скорректирована. Для реалистической оценки ожидаемого расстояния должны быть приняты во внимание дополнительные потери. Факт наличия или отсутствия связи оценивался с помощью встроенного в модуль цифрового показателя уровня принимаемого сигнала (RSSI) с учетом вносимых потерь. RSSI описывает сред-

ний уровень мощности принимаемого сигнала при приеме пакета. Данный метод не является сверхточным, но позволяет решить поставленные задачи.

Для проверки дальности связи использовались две отладочные платы с трансивером RFM23BP. Одна из них играла роль пульта дистанционного управления (ПДУ), а другая – дистанционно управляемой мишени (ДУМ). Плата ПДУ была расположена в фиксированном положении (нулевая точка отсчета на рис. 1) на высоте  $1 \pm 0,1$  м. К ней была подключена четвертьволновая штыревая антенна. Плата ДУМ перемещалась относительно точек замера. Частота, на которой работали устройства, – 446 МГц. Измерения в каждой точке проводились со сменой типа антенны на плате ДУМ с фиксацией значений RSSI и процента пропуска пакетов (оценочно 10 пакетов). Расстояние между нулевой и шестой точкой 520,25 м. Мощность в приемопередатчике установлена на уровне 0,501 Вт. Результаты измерений сведены в табл. 2.



Рис. 1. Схема проведения испытаний, полученная со спутника

Волны ISM-диапазона распространяются в пределах прямой видимости. Расстояние между точками 0 и 1 составляет 94,2 м, между 0 и 2 – 183,9 м, между 0 и 3 – 270,4 м, между 0 и 4 – 366,7 м, между 0 и 5 – 456,7 м. Измерения проводились при переменной облачности, без осадков.

Таблица 2. Результаты измерений

Вид антенны	Точка отсчета (столбцы)					
	1	2	3	4	5	6
	Значение RSSI					
Спиральная	140	114	120 <sup>*</sup>	–	102 <sup>***</sup>	–
Дипольная	140	119	130	100 <sup>*</sup>	100 <sup>**</sup>	108 <sup>***</sup>
Штыревая ( $\lambda/4$ )	141	117	132	112 <sup>*</sup>	100 <sup>**</sup>	100 <sup>***</sup>
Штыревая ( $\lambda/2$ )	144	130	135	130	116 <sup>*</sup>	115 <sup>*</sup>

<sup>\*</sup> пропуск пакетов 10 %

<sup>\*\*</sup> пропуск пакетов 50 %

<sup>\*\*\*</sup> пропуск пакетов 90 %

Результаты испытаний показывают, что наилучшие характеристики система показывает при использовании полуволновой штыревой антенны. В этом случае при замере между нулевой и шестой точкой RSSI составил 115 единиц, при этом пропуск пакетов равен 10 %. При использовании спиральной антенны нам не удалось установить факт наличия связи в 4-й и 6-й точках. Отсутствие связи в 4-й точке могло быть спровоцировано наличием препятствия, а именно – бетонной плиты. Спиральные антенны несколько хуже штыревых, но у них есть одно неоспоримое преимущество – при сравнимом ухудшении характеристик они гораздо более компактны. Дипольная и четвертьволновая штыревая антенны устанавливают факт наличия связи между нулевой и шестой точкой (напомним, что расстояние между ними составляет 520,25 м), но ценой больших потерь. В среднем из десяти пакетов стабильно принимается только один.

### Заключение

Таким образом, был проведен обзор трансиверов ISM-диапазона повышенной мощности. По цене подобное решение уже не сильно отличается от сборки на дискретных компонентах и обладает рядом преимуществ, среди которых: минимальное время проектирования, низкие затраты на оценку и тестирование и т. д. Дальность связи в свободном пространстве можно оценить с помощью уравнения Фрииса. Факт установления связи может быть оценен с помощью показателя уровня принимаемого сигнала (RSSI), а дистанция связи может быть оценена с помощью систем GPS/ГЛОНАСС на мобильном устройстве с закреплением точек по координатам широты и долготы. По результатам первого испытания можно сказать, что штыревая полуволновая антенна обладает лучшими характеристиками. Связь не была обеспечена на требуемом расстоянии. Поскольку мощность увеличивать нельзя (ограничена на уровне 0,5 Вт для диапазона 446–446,1 МГц законодательно ГКРЧ за

номером № 05-10-01-001 «Об использовании полос радиочастот радиоэлектронными средствами фиксированного беспроводного доступа»), можно воспользоваться другими антеннами с лучшими характеристиками или применить режим ретрансляции в системе.

### Список литературы

1. *Ричард, У.* Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? // *Новости электроники.* – 2015. – № 11. – С. 3–13.
2. *Павлов, Д.* Однокристалльные радиочастотные приемопередатчики ISM-диапазонов // *Современная электроника.* – 2005. – № 1 (82). – С. 18–23.
3. Построение модулей дистанционного управления и анализ их характеристик / *М. А. Бояршинов, В. В. Хворенков, М. Ю. Васильев, П. В. Караваев* // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.* – 2015. – № 1 (65). – С. 70–73.

*M. A. Boyarshinov*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: mabkb@istu.ru

*M. Y. Vasiliev*, educational master

E-mail: vasm@istu.ru

*A. S. Kolotov*, magister student

E-mail: ankol95@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### The Choice of ISM Band Transceiver Modules for Remote Control in the Target Complex

*The article deals with the most suitable transceivers, which can be used to organize communications in the target complex. The analysis of tactical-technical features of the modules is made. The results of the theoretical calculation of the range of communication on the ground are reflected. The tests with different types of antennas are made.*

**Keywords:** target complex, transceiver module, ISM band, range of communication, RSSI.

---

УДК 004.415:621(045)

*М. А. Бояршинов*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: mabkb@istu.ru

*Р. А. Хатбуллин*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: rxn3110c@ Rambler.ru

*А. А. Зыкин*, магистрант

E-mail: soyp2013@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Удаленное управление контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW**

*В статье рассматривается реализация удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW. Приведены примеры программ в LabVIEW для реализации удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой.*

**Ключевые слова:** удаленное управление, контрольно-измерительная аппаратура, LabVIEW, Rohde & Schwarz.

### **Введение**

В статье рассмотрены примеры формирования радиосигналов с помощью универсального программируемого SDR трансивера USRP X300 и удаленного управления цифровым осциллографом R&S RTO 2044 для измерения параметров сигналов. Также описана методика удаленного управления анализатором спектра и сигналов R&S FSW8 и векторным генератором сигналов R&S SMW200A.

### **Удаленное управление контрольно-измерительной аппаратурой**

Первые шаги по созданию локальных вычислительных сетей, формирование на их основе корпоративных сетей и, как следствие, появление глобальной сети интернет открыло широкие возможности по взаимодействию различных структур между собой. Перспектива такого взаимодействия проявилась в возникновении такого понятия, как «интернет вещей» (IoT, Internet of Things) [1].

В общем случае под интернетом вещей понимается совокупность разнообразных приборов, датчиков, устройств, объединенных в сеть посредством любых доступных каналов связи, использующих различные протоколы взаимодействия между собой и единственный протокол

доступа к глобальной сети. В роли глобальной сети для интернета вещей в настоящий момент используется сеть интернет. Общим протоколом является IP [2].

В качестве одного из вариантов построения и организации интернета вещей рассмотрим программно-аппаратный комплекс удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW, построенный в виде сети на основе компьютеров, приборов, оборудования и программного обеспечения.

Программно-аппаратный комплекс является инструментом для оперативного выполнения поставленных научно-производственных задач. Основные возможности программно-аппаратного комплекса:

- формирование радиосигналов с различными видами модуляции (манипуляции) на различных частотах;
- имитация сигналов радиопомех;
- имитация приема-передающих систем;
- имитация передачи и приема различных видов (протоколов) цифровых данных;
- измерение параметров радиосигналов, их верификация (например, с результатами математического моделирования) и сохранение в базе данных;
- выполнение тестирования изделий, измерение параметров.

На рис. 1 представлена структурная схема программно-аппаратного комплекса удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz и SDR трансивером USRP X300.

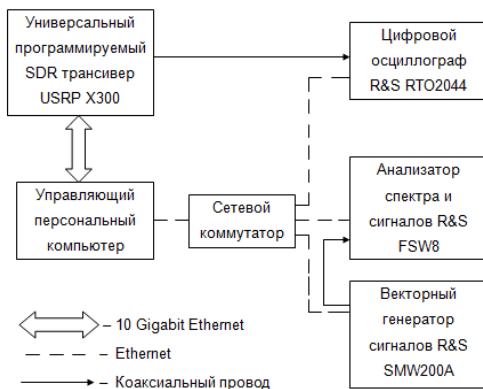


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz и SDR трансивером USRP X300

## Формирование радиосигналов с помощью SDR трансивера USRP X300

Моделирование формирования радиосигналов осуществляется в среде разработки LabVIEW и с помощью универсального программируемого SDR трансивера USRP X300.

LabVIEW является идеальным программным средством для создания систем измерения, а также систем автоматизации управления на основе технологии виртуальных приборов. LabVIEW – программа в комплексе с измерительными приборами, подключаемыми к компьютеру через стандартные интерфейсы RS-232, RS-485, USB, GPIB, Ethernet, PXI, VXI, которая позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности [3].

Рассмотрим формирование сигнала с модуляцией BPSK в программе LabVIEW с использованием универсального программируемого приемопередатчика USRP X300.

Перед началом работы с USRP X300 необходимо установить на компьютер соответствующий драйвер USRP Hardware Driver™ для устройства USRP X300. Далее открываем пример формирования сигнала с модуляцией PSK (niUSRP EX PSK Tx). На рис. 2 представлена лицевая панель имитационной модели передатчика сигнала с модуляцией BPSK.

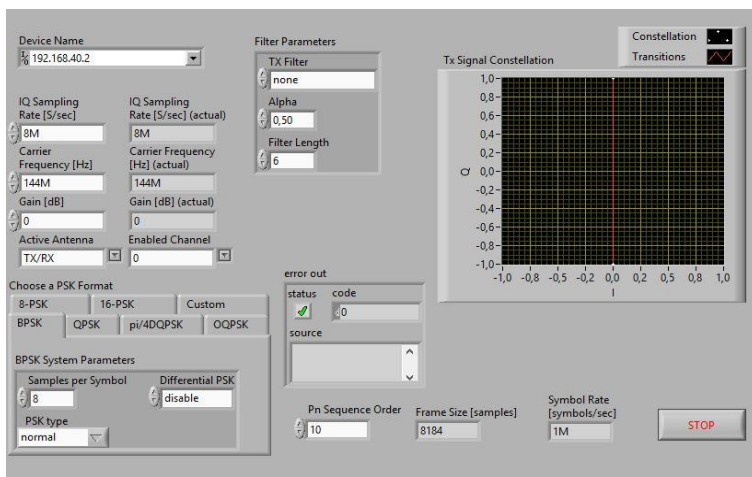


Рис. 2. Лицевая панель имитационной модели передатчика сигнала с модуляцией BPSK

В лицевой панели задается имя устройства (Device Name, в данном случае IP-адрес SDR трансивера) для инициализации устройства USRP X300. Также в лицевой панели задаются параметры сигнала, тип модуляции PSK и выбирается антенна для передачи сигнала с помощью SDR трансивера USRP X300. В лицевой панели отображаются количество отсчетов, символьная скорость передачи сигнала, график сигнального созвездия радиосигнала BPSK, количество ошибок и место возникновения в блок-диаграмме имитационной модели формирования радиосигнала BPSK.

С лицевой панели можно как запустить процесса передачи BPSK сигнала, так и остановить передачу посредством нажатия на кнопку «stop». Сформированный сигнал подается на вход первого канала цифрового осциллографа R&S RTO2044 с помощью кабеля SMA(m)-to-SMA(m). Для подключения приемопередатчика USRP к осциллографу R&S RTO2044 с помощью кабеля SMA(m)-to-SMA(m) необходимо использовать переходник SMA(m)-BNS.

### Удаленное управление цифровым осциллографом R&S RTO2044 с помощью LabVIEW

Удаленное управление прибором R&S RTO2044 может осуществляться по следующим интерфейсам: IEEE 488.2 (GPIB), USB, Ethernet. Для удаленного управления осциллографом R&S RTO2044 была разработана программа в LabVIEW. Лицевая панель программы удаленного управления цифровым осциллографом R&S RTO2044 представлена на рис. 3.

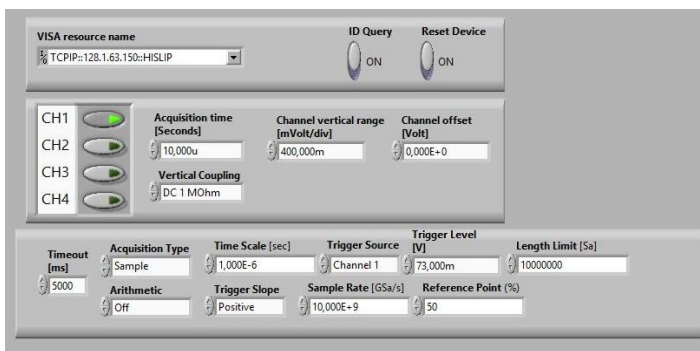


Рис. 3. Лицевая панель программы удаленного управления цифровым осциллографом R&S RTO2044



В лицевой панели прописывается IP-адрес прибора для инициализации устройства R&S RTO2044. Также в лицевой панели программы удаленного управления осуществляется настройка прибора, а именно настройка вертикальной и горизонтальной развертки, выбор канала отображения, скорость обзора канала и так далее.

Отображаемый сигнал в дисплее осциллографа R&S RTO2044 также можно наблюдать и на лицевой панели программы удаленного управления осциллографом R&S RTO2044. На рис. 4 представлена осциллограмма сигнала BPSK в программе удаленного управления прибором R&S RTO2044.

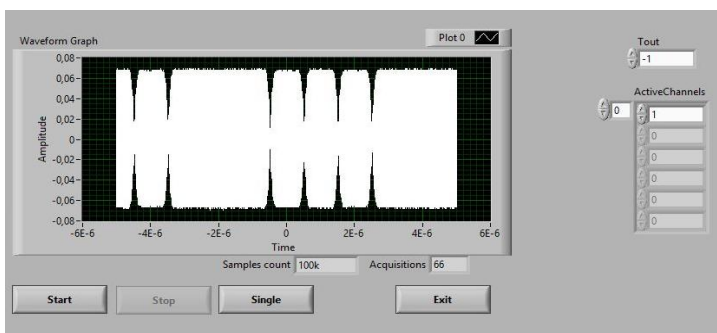


Рис. 4. Осциллограмма сигнала BPSK в программе удаленного управления цифровым осциллографом R&S RTO2044

### Удаленное управление векторным генератором сигналов R&S SMW200A и анализатором спектра и сигналов R&S FSW8

Векторный генератор сигналов R&S SMW200A позволяет генерировать сигналы как с аналоговой модуляцией, так и с цифровой модуляцией, а также формировать преднамеренные помехи. Для удаленного управления векторным генератором сигналов R&S SMW200A была разработана программа в LabVIEW. Данная программа позволяет удаленно генерировать сигналы с цифровой модуляцией. На рис. 5 представлена лицевая панель программы удаленного управления прибором R&S SMW200A.

В программе удаленного управления прибором R&S SMW200A осуществляется настройка прибора на формирование сигнала с цифровой модуляцией.

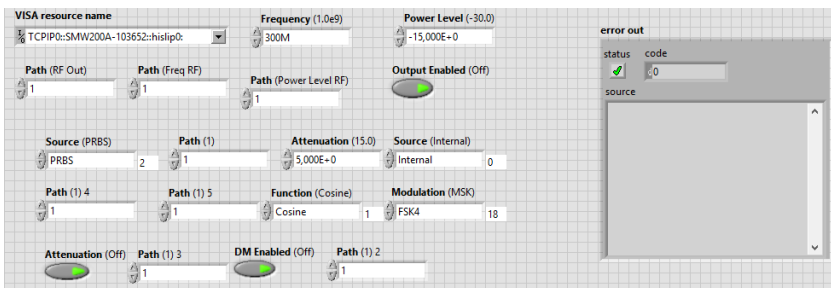


Рис. 5. Лицевая панель программы удаленного управления векторным генератором сигналов R&S SMW200A

Сформированный сигнал с цифровой модуляцией с выхода ВЧ поступает на вход анализатора спектра и сигналов R&S FSW8. С помощью программы удаленного управления настраиваем генератор на генерацию сигнала с модуляцией FSK4.

Контрольно-измерительным прибором R&S FSW8 также можно управлять удаленно. Для удаленного управления прибором необходимо установить соответствующий драйвер прибора R&S FSW8 для программы LabVIEW. Далее была разработана программа в LabVIEW для удаленного управления анализатором спектра и сигналов.

Лицевая панель программы для удаленного управления R&S FSW8 представлена на рис. 6. Данная программа позволяет отображать спектр входного сигнала.

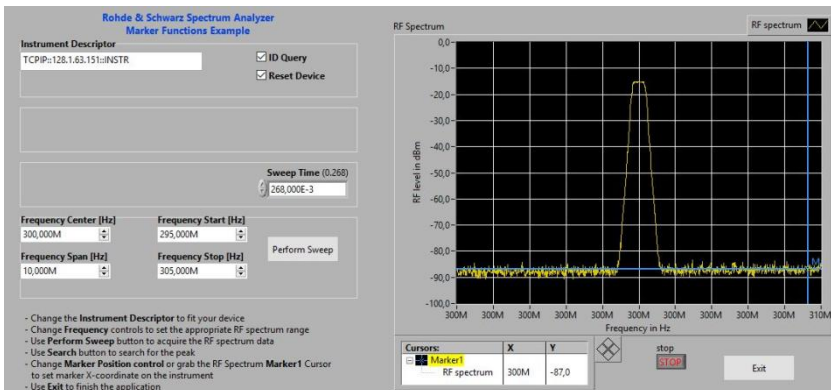


Рис. 6. Лицевая панель программы удаленного управления анализатором спектра и сигналов R&S FSW8

В лицевой панели отображается спектр сигнала с модуляцией FSK4 на несущей частоте, равной 300 МГц, и полосой обзора 10 МГц.

### Выводы

В работе приведен программно-аппаратный комплекс удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW. Разработка комплекса была выполнена для исследования возможности построения инструмента оперативного решения научно-производственных задач (НИР). Программно-аппаратный комплекс позволяет решать задачи тестирования и измерения параметров изделий на различных этапах его разработки. Комплекс позволяет имитировать прием и передачу радиосигналов в условиях воздействия естественных и искусственных помех, в том числе создаваемых постановщиками помех. Позволяет проводить оценку помехоустойчивости различных радиосигналов и различных радиотерминалов.

Были созданы программы для удаленного управления контрольно-измерительными приборами компании Rohde & Schwarz с помощью среды разработки и платформы для выполнения программ LabVIEW. При этом созданная система может быть расширена в будущем при добавлении других контрольно-измерительных приборов, а также могут быть расширены функциональные возможности удаленного управления для имеющихся контрольно-измерительных приборов.

### Список литературы

1. *Пушкарев, М. С.* Интернет вещей (IoT): понятие и значение для формирования правовой основы цифровой трансформации экономики // Вопросы российского и международного права. – 2018. – Т. 8, № 1А. – С. 16–27.
2. *Росляков, А. В.* Интернет вещей : учеб. пособие / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. – Самара : ПГУТИ, 2015. – 200 с.
3. *Евдокимов, Ю. К.* LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М. : ДМК «Пресс», 2007. – 400 с.

*M. A. Boyarshinov*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: mabkb@istu.ru

*R. A. Khatbullin*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: rxn3110c@rambler.ru

*A. A. Zykin*, magister student

E-mail: soyp2013@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **The Remote Control of Rohde & Schwarz Instrumentation Equipment Using LabVIEW**

*The article deals with the implementation of remote control of Rohde & Schwarz instrumentation equipment using LabVIEW. Exemplify of programs in LabVIEW for implementing remote control of instrumentation equipment.*

**Keywords:** remote control, control instrumentation, LabVIEW, Rohde & Schwarz.

---

УДК 621.396

*Р. Ф. Гумиров*, магистрант

E-mail: [nimguzilx@ya.ru](mailto:nimguzilx@ya.ru)

*Марков М. М.*, канд. техн. наук, доц.

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Определение оптимального усиления для достижения максимального динамического диапазона**

*Рассматривается влияние уровня усиления на динамический диапазон принимаемого сигнала. Приведены основные формулы для определения оптимального уровня усиления, при котором уровень помеховых составляющих минимален и не ограничивает динамический диапазон. На основе теоретических положений проведено математическое моделирование с целью проверки достоверности решения.*

**Ключевые слова:** динамический диапазон, интермодуляционные искажения, шумы, уровень усиления, спектр.

### **Введение**

При приеме сигнала существуют факторы, влияющие на его динамический диапазон, среди которых можно выделить два основных – это продукты интермодуляции 3-го порядка и уровень тепловых шумов, влияние которых в свою очередь зависит от усиления принимаемого сигнала. При слабом усилении сигнала уровни продуктов 3-го порядка, генерируемых в нелинейных устройствах, будут низки, и в то же время отношение входного сигнала к тепловым шумам (отношение сигнал/шум) будет также невелико. В данном случае уровень полезного сигнала невысок и динамический диапазон ограничен тепловыми шумами [1] (рис. 1). С другой стороны, при сильном усилении сигнала генерируемые продукты интермодуляции имеют уровень, превышающий уровень шума, и становятся видимыми в спектре (рис. 2). В этом случае уровень полезного сигнала высок, а динамический диапазон оказывается ограничен продуктами интермодуляции 3-го порядка, уровень которых уже стал значительным [2]. На практике необходимо иметь такой диапазон, при котором спектр сигнала не содержит выраженных продуктов интермодуляции и уровень шумов не зажимает уровень полезного сигнала.

Таким образом, возникает задача, которая заключается в поиске компромисса между уровнем усиления входного сигнала и искажающими факторами – продуктами интермодуляции 3-го порядка и собственными тепловыми шумами усилительного устройства. Иными словами, необходимо определить оптимальный уровень усиления, при котором уровень интермодуляционных составляющих и тепловых шумов будет минимальным.

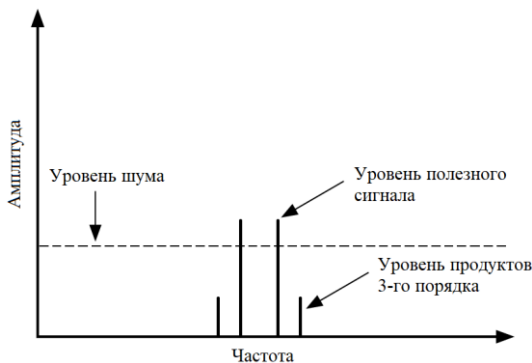


Рис. 1. Динамический диапазон при слабом усилении сигнала

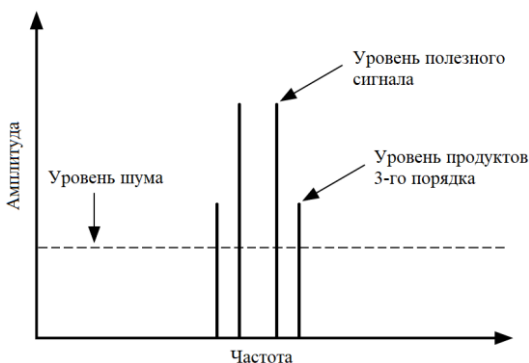


Рис. 2. Динамический диапазон при сильном усилении сигнала

### Решение задачи

Зная взаимосвязь факторов искажения от уровня усиления входного сигнала, данную зависимость можно выразить при помощи формул и представить графически. Приняв уровень усиления за уровень полезно-

го сигнала, уровень тепловых шумов относительно него может быть выражен как

$$L_N = L_{noise} - L_G,$$

где  $L_N$  – уровень шума относительно уровня усиления, дБм;  $L_G$  – уровень усиления, дБм;  $L_{noise}$  – тепловой шум, дБм.

Аналогично уровень интермодуляционных искажений относительно полезного сигнала выражается [3] как

$$L_{IMn} = -(n-1) \cdot (IPn_{in} - L_G),$$

где  $L_{IMn}$  – уровень продуктов интермодуляции  $n$ -го порядка относительно уровня усиления, дБм;  $n$  – порядок интермодуляции;  $IPn_{in}$  – точка перехвата интермодуляции  $n$ -го порядка, дБм.

Тогда графическое представление данных зависимостей примет вид, представленный на рис. 3.

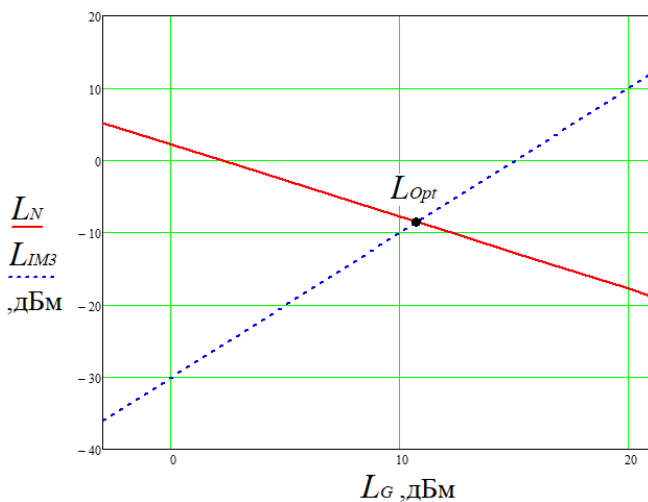


Рис. 3. Зависимость факторов искажения от уровня усиления

Как видно из рис. 3, уровень тепловых шумов уменьшается с увеличением уровня усиления, а уровень продуктов интермодуляции из-за этого растет, в обратном случае – наоборот. Оптимальный уровень усиления и, следовательно, максимально достижимый динамический диапазон получается на точке пересечения линии уровня теплового шума и

линии интермодуляционных продуктов 3-го порядка, где обе составляющие относительно минимальны. Поскольку на этой точке уровень продуктов интермодуляции равен уровню теплового шума, то приравнивая формулы по определению  $L_{IM3}$  и  $L_N$ , оптимальный уровень усиления выражается как

$$L_{Gopt} = \frac{(n-1) \cdot IPn_{in} + L_{noise}}{n},$$

где  $L_{Gopt}$  – оптимальный уровень усиления, дБм;  $IPn_{in}$  – точка перехвата  $n$ -го порядка, дБм;  $n$  – порядок интермодуляционных продуктов.

Для проверки теории была составлена модель в среде имитационного моделирования Simulink, рис. 4.

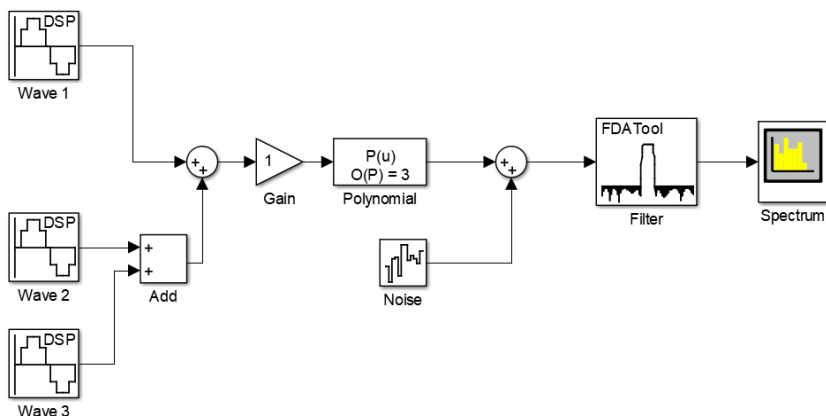


Рис. 4. Имитационная модель с нелинейностью и наличием шума

В данной модели блок Wave 1 генерирует полезный сигнал с частотой 100 МГц, блоки Wave 2 и Wave 3 генерируют помеховые внеполосные сигналы с частотой 130 МГц и 150 МГц, Gain отвечает за уровень усиления сигнала, Polynomial симулирует нелинейную характеристику, Noise представляет собой тепловой шум, Filter проводит фильтрацию, в результате которой остается полезный сигнал 100 МГц и продукт интермодуляции 3-го порядка 110 МГц, Spectrum отображает спектр сигнала.



### Результаты и их обсуждение

При минимальном усилении сигнала спектр состоит только из одного выделенного фильтром шума, а уровень сигнала и уровень продуктов интермодуляции 3-го порядка на его фоне стали неразличимы, поскольку их уровень находится гораздо ниже, рис. 5. Уровень усиления составляет  $L_G = -3,01$  дБм, уровень шума  $L_{noise} = 5,21$  дБм, уровень продуктов  $L_{IM3} = -36,12$  дБВ.

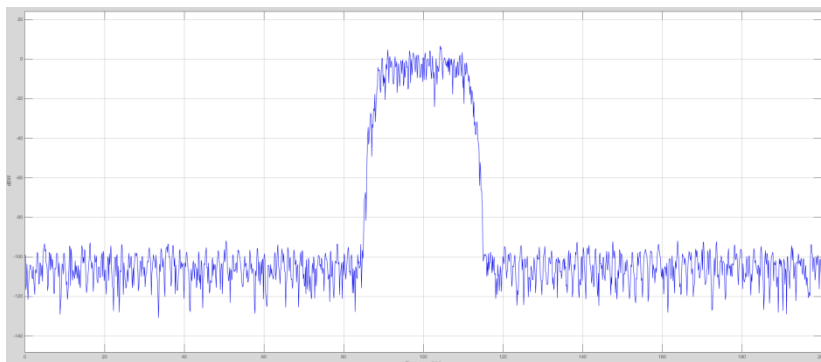


Рис. 5. Спектр сигнала при минимальном усилении

При максимальном усилении сигнала в спектре отчетливо наблюдается полезный сигнал на 100 Гц, но вместе с ним появился продукт интермодуляции 3-го порядка на 110 Гц, а уровень шумов остался на исходном уровне. Уровень усиления составляет  $L_G = 21,07$  дБм, уровень шума  $L_{noise} = -18,87$  дБм, уровень продуктов  $L_{IM3} = 12,04$  дБм.

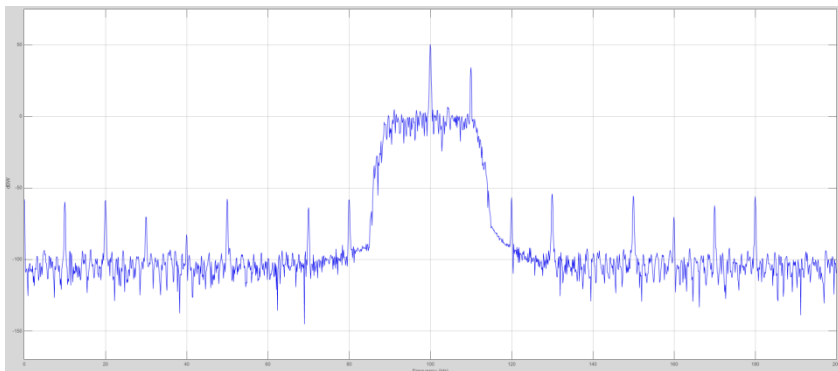


Рис. 6. Спектр сигнала при максимальном усилении

В случае оптимального уровня усиления в спектре продолжает наблюдаться полезный сигнал на 100 Гц, а продукт интермодуляции 3-го порядка скрылся за шумом, поскольку при оптимальном усилении уровень шумов и интермодуляционных продуктов становится равным, что подтверждает достоверность теории и адекватность разработанной модели. Уровень усиления составляет  $L_G = 10,76$  дБм, уровень шума  $L_{noise} = -8,56$  дБм, уровень продуктов  $L_{IM3} = -8,56$  дБм.

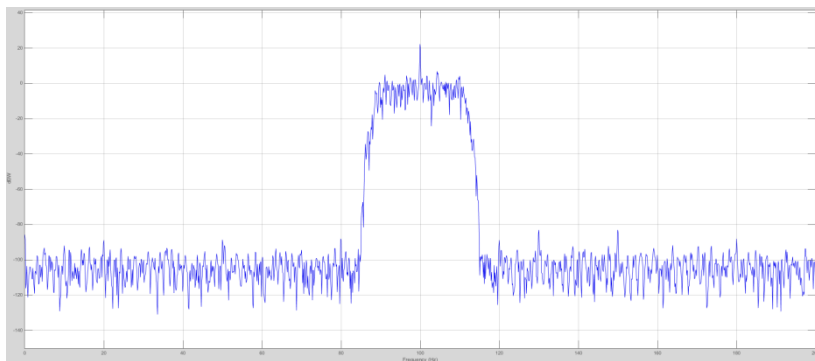


Рис. 7. Спектр при оптимальном усилении сигнала

## Вывод

При осуществлении приема сигнала и последующем его усилении с ростом уровня сигнала растет уровень интермодуляционных искажений, а с его понижением – уровень тепловых шумов, что в обоих случаях

имеет влияние на величину динамического диапазона. В связи с этим необходимо решать задачу по определению оптимального уровня сигнала, при котором уровень интермодуляционных помех и тепловых шумов должен сравняться и быть минимальным. Решение задачи показало, что, зная зависимость параметров между собой, можно рассчитать значение оптимального усиления при помощи формул, приведенных в основной части работы. Результаты, полученные в ходе моделирования, подтвердили сходимость с представленной теорией.

### Список литературы

1. *Tomarakos, J.* Relationship of data word size to dynamic range and signal quality in digital audio processing applications [Электронный ресурс] // Analog Devices [Сайт]. – URL: <http://www.analog.com/en/education/education-library/articles/relationship-data-word-size-dynamic-range.html> (дата обращения: 02.06.2018).
2. *Henn, C.* Intermodulation distortion (IMD) // Burr-Brown Application Bulletin. – URL: <http://www.ti.com/lit/an/sboa077/sboa077.pdf> (дата обращения: 02.06.2018).
3. *Schaffner, J. H.* Dynamic range microwave fiber-optic links with linearized modulators / J. H. Schaffner, W. B. Bridges // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1993. – Vol. 11, no. 1. – Pp. 3–6. – URL: <https://authors.library.caltech.edu/10064/1/SCHAjlt93.pdf> (дата обращения: 04.06.2018).

*R. F. Gumirov*, magister student

E-mail: [nimruzilx@ya.ru](mailto:nimruzilx@ya.ru)

M. M. Markov, CSc in engineering, associate professor

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Determination of Optimal Gain for Obtaining the Maximum Dynamic Range

*The effect of the gain level on the dynamic range of the received signal is considered. The basic formulas for determining the optimal level of amplification, in which the level of noise components is minimal and does not limit the dynamic range. On the basis of theoretical provisions, mathematical modeling was carried out to verify the reliability of the solution.*

**Keywords:** dynamic range; intermodulation distortion; noise; gain level; spectrum.

УДК 681.785

*М. Р. Зарипов*, ассистент  
E-mail: zaripov.istu@gmail.com  
*В. А. Алексеев*, д-р техн. наук, проф.  
*А. С. Перминов*, ст. преподаватель  
*Д. Н. Шульмин*, соискатель

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Повышение эффективности лазерных систем

*Приведена структурная схема и описан принцип действия системы, обеспечивающей многократное повышение эффективности лазерных импульсных источников без увеличения энергии электропитания. Получен график зависимости энергетической эффективности системы от числа линий оптических задержек. Определено предельное значение энергетической эффективности и соответствующее ему число линий задержек.*

**Ключевые слова:** энергия импульса, амплитуда импульса, линии задержки, энергетическая эффективность, оптическое волокно.

### Введение

При создании лазерных систем специального назначения, содержащих автономные источники электропитания, существует проблема повышения интенсивности лазерного излучения без увеличения энергии электропитания. В представленной работе приведен способ решения данной проблемы за счет увеличения суммарной амплитуды импульса излучения путем синхронного сложения нескольких импульсов.

Подобное увеличение амплитуды может найти применение при создании: во-первых, систем связи, где необходимо обеспечить прохождение сигнала (импульса) через различные среды; во-вторых, систем зондирования различных сред (лидары) и измерителей дальности и оптической плотности неоднородных сред; в-третьих, специальных систем, где основное воздействие на объект связано с амплитудой импульса.

### Постановка задачи

Механизм воздействия лазерного излучения на какую-либо среду можно рассматривать следующим образом (рис. 1):

– 1-й случай – воздействие излучением на среду с определенным уровнем энергии  $E$  за промежутки времени  $\tau_1$ ;

– 2-й случай – воздействие этой же энергией  $E$  за промежуток времени  $\tau_2$ , меньший временного промежутка  $\tau_1$ .

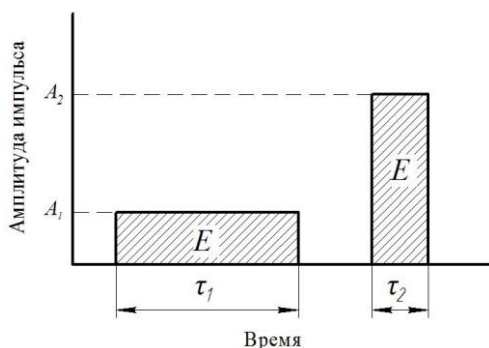


Рис. 1. Формы импульса с одинаковой энергией  $E$  и разными длительностями  $\tau_1$  и  $\tau_2$

Если в 1-м и 2-м случаях вся энергия поглощается веществом, то воздействие можно считать аналогичным, если апертура пучка одна и та же. Однако нарастание энергии при воздействии на один и тот же объект различно, это может привести к разному физическому характеру воздействия.

Длительность импульса  $\tau$  и его амплитуда  $A$  с одной стороны определяют энергию импульса, а с другой стороны определяют воздействие на объект в зависимости от его свойств. Это время  $\tau_{\text{погл}}$ , за которое объект может поглотить долю  $E_1$  энергии импульса. Если энергия импульса  $E$  больше  $E_1$  при длительности  $\tau = \tau_{\text{погл}}$ , то часть энергии импульса  $\Delta E = E - E_1$  не будет поглощена объектом.

При увеличении длительности импульса  $\tau > \tau_{\text{погл}}$  будет возрастать пороговое значение  $E_1$ . В итоге для каждой длительности импульса воздействия существует свое пороговое значение энергии, которое успеет проникнуть в объект [1].

Таким образом, эффективность импульсных лазерных систем с синхронным накоплением энергии импульсов через задержку будет определяться длительностью и энергией импульсов лазерной системы на выходе.

Для решения задачи накопления импульсов предлагается следующий подход [2]. Увеличение энергии импульса лазерного излучения производить за счет накопления энергии множества импульсов через использование линий оптической задержки для каждого очередного генерируемого лазером импульса. Количество сложенных импульсов излуече-

ния за исключением потерь в оптоволоконных линиях задержки и определит выходную энергию импульсов излучения. Частота следования импульсов при этом уменьшается, но для ряда задач это не влияет на работоспособность систем в специальных условиях (рис. 2).

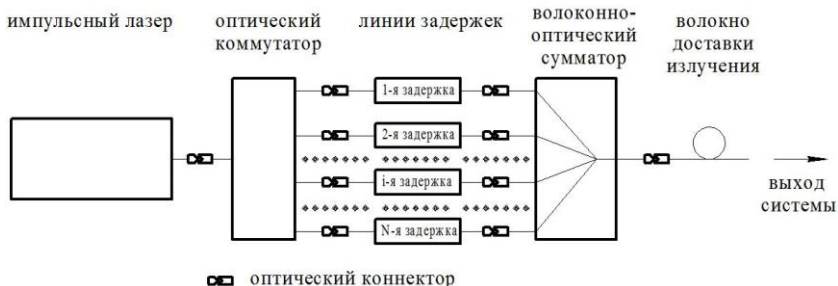


Рис. 2. Структурная схема системы синхронного суммирования лазерных импульсов

Принцип действия рассматриваемой лазерной системы следующий. Импульсный лазер через отрезок оптического волокна испускает излучение с частотой  $F$  на вход оптического коммутатора, который последовательно направляет поступающие на него импульсы на элементы оптических линий задержек (от 1-й до  $N$ -й), представляющих собой набор отрезков оптического волокна. Каждый последующий оптоволоконный элемент увеличивается на длину шага задержки, соответствующую геометрической длине распространения излучения в волокне за период следования импульсов. Это обеспечивает синхронное поступление всех  $N$  импульсов на входы оптического сумматора, способствуя формированию на выходе сумматора импульса с энергией, равной сумме энергий исходных лазерных импульсов с учетом определенных потерь.

Однако увеличение числа линий задержек приводит к нарастанию длины волокна и соответственно повышению потерь каждого последующего элемента оптической задержки. А это значит, что количество линий задержек и, соответственно, эффективность системы будут ограничены величиной потерь в оптическом волокне.

### Решение задачи

Ослабление лазерного излучения в системе на рис. 2 происходит в результате следующих процессов.

Каждый исходный импульс лазерного излучения, распространяясь через  $i$ -ю линию задержки в системе, действующей по схеме на рис. 2,

претерпевает последовательно: потери в оптическом волокне ( $T_{\text{ЛК}}$ ) и первом коннекторе ( $T_{\text{К}}$ ) от выхода импульсного лазера до оптического коммутатора; потери в оптическом волокне  $i$ -й линии задержки ( $T_{\text{КCi}}$ ) и втором и третьем коннекторах ( $T_{\text{К}}$ ) от коммутатора до сумматора; потери в выходном волокне доставки излучения ( $T_{\text{СВ}}$ ) и четвертом коннекторе ( $T_{\text{К}}$ ) от сумматора до выхода системы.

Тогда энергия одного лазерного импульса, прошедшего систему через  $i$ -ю линию задержки, будет определяться как

$$E_i = E_0 \cdot T_{\text{К}}^4 \cdot T_{\text{ЛК}} \cdot T_{\text{КCi}} \cdot T_{\text{СВ}}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – энергия исходного импульса лазерного излучения;  $T_{\text{К}}$  – коэффициент пропускания коннектора;  $T_{\text{ЛК}}$  – коэффициент пропускания оптического волокна на пути от импульсного лазера до оптического коммутатора;  $T_{\text{КCi}}$  – коэффициент пропускания оптического волокна  $i$ -й линии задержки;  $T_{\text{СВ}}$  – коэффициент пропускания оптического волокна на пути от волоконно-оптического сумматора до выхода из системы.

При этом указанные в формуле (1) коэффициенты пропускания вычисляются следующим образом.

Коэффициент пропускания коннектора:

$$T_{\text{К}} = 10^{-0,1 \cdot dB_{\text{К}}}, \quad (2)$$

где  $dB_{\text{К}}$  – потери в коннекторе.

Коэффициент пропускания оптического волокна на пути от импульсного лазера до оптического коммутатора:

$$T_{\text{ЛК}} = 10^{-0,1 \cdot dB_{\text{В}} \cdot L_{\text{ЛК}}}, \quad (3)$$

где  $dB_{\text{В}}$  – удельные потери в оптическом волокне;  $L_{\text{ЛК}}$  – длина оптического волокна от импульсного лазера до оптического коммутатора.

Коэффициент пропускания оптического волокна на пути от волоконно-оптического сумматора до выхода системы:

$$T_{\text{СВ}} = 10^{-0,1 \cdot dB_{\text{В}} \cdot L_{\text{СВ}}}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{СВ}}$  – длина оптического волокна от волоконно-оптического сумматора до выхода системы.

Коэффициент пропускания оптического волокна  $i$ -й линии задержки:

$$T_{\text{КCi}} = 10^{-0,1 \cdot dB_{\text{В}} \cdot L_i}, \quad (5)$$

где  $L_i$  – длина оптического волокна  $i$ -й линии задержки, которая в свою очередь определяется по формуле

$$L_i = i \cdot \Delta, \quad (6)$$

где  $\Delta$  – длина отрезка оптического волокна, соответствующая элементарному шагу задержки. С учетом принципа действия рассматриваемой системы эта длина вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{c}{F \cdot n}, \quad (7)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $F$  – частота следования исходных импульсов лазера;  $n$  – показатель преломления материала оптического волокна.

Тогда энергия лазерного импульса, полученного в результате синхронного суммирования  $N$  исходных импульсов с энергией  $E_0$ , на выходе системы будет определяться как

$$E_N = \sum_{i=1}^N E_i = E_0 \cdot T_K^4 \cdot T_{\text{ЛК}} \cdot T_{\text{СВ}} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{-0,1 \cdot dB_B \cdot \Delta \cdot i}. \quad (8)$$

### Результаты и их обсуждение

Интерес в данной работе представляет коэффициент энергетической эффективности системы, показывающий, во сколько раз суммарная выходная энергия импульса  $E_N$  превысит энергию исходного импульса  $E_0$ :

$$\eta = \frac{E_N}{E_0} = T_K^4 \cdot T_{\text{ЛК}} \cdot T_{\text{СВ}} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{-0,1 \cdot dB_B \cdot \Delta \cdot i}. \quad (9)$$

При  $N \rightarrow \infty$  формула (9) преобразуется к виду, который позволит определить предельно достижимый коэффициент энергетической эффективности рассматриваемой системы:

$$\eta_{\text{пред}} = T_K^4 \cdot T_{\text{ЛК}} \cdot T_{\text{СВ}} \cdot \frac{10^{-0,1 \cdot dB_B \cdot \Delta}}{1 - 10^{-0,1 \cdot dB_B \cdot \Delta}}. \quad (10)$$

Для оценки предельного числа линий задержки в работе были проведены расчеты коэффициента энергетической эффективности  $\eta$ . Значения потерь в соответствии с [3] были приняты следующими:  $dB_K = 0,15$  дБ,  $dB_B = 0,2$  дБ/км. Частота следования импульсов лазера QDFBLD-1550-5, выбранного в качестве источника исходных импульсов в рассматриваемой системе, была принята равной  $F = 100$  МГц при



предельной частоте импульсов в  $2,5 \text{ ГГц}^7$ . При этом для длины волны  $1550 \text{ нм}$ , на которой излучает выбранный лазер, показатель преломления материала кварцевого оптического волокна составляет  $n = 1,44$  [4].

С учетом заданных выше параметров отдельных элементов рассматриваемой системы была получена зависимость  $\eta(N)$  коэффициента энергетической эффективности от числа линий задержки (рис. 3).

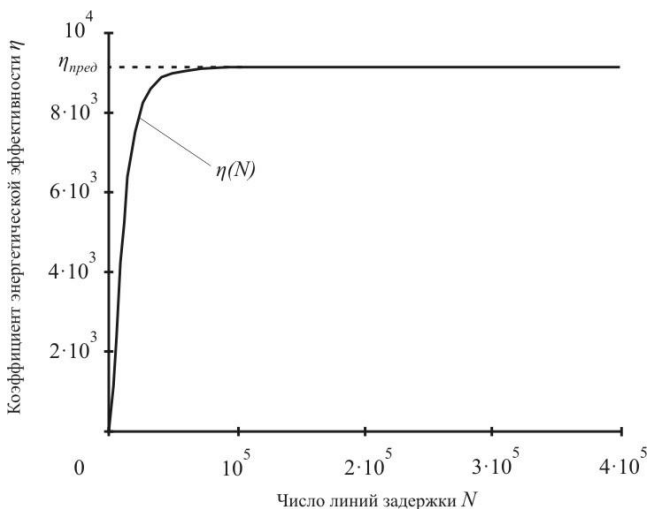


Рис. 3. Зависимость коэффициента энергетической эффективности от числа линий задержки

На графике (рис. 3) видно, что энергетическая эффективность системы  $\eta$  с увеличением числа линий  $N$  от линейной зависимости с быстрым нарастанием переходит к так называемому насыщению, при котором значение эффективности  $\eta$  остается неизменным при возрастании числа  $N$ .

Предельное значение коэффициента эффективности составило  $\eta_{\text{пред}} = 9077$ . Этому значению соответствует число линий задержек  $N_{\text{пред}} = 1,2 \cdot 10^5$ , при превышении которого не происходит дальнейшего возрастания эффективности рассматриваемой системы.

<sup>7</sup> Wavelength stabilized single mode fiber coupled DFB laser diode, 5mW @ 1550nm, QDFBLD-1550-5 [Электронный ресурс] // QPhotonics, Laser diode online store [Сайт]. – URL: <http://www.qphotonics.com/SALE-Wavelength-stabilized-single-mode-fiber-coupled-laser-diode-5mW-1550nm.html> (дата обращения: 08.06.2018).

## Выводы

Таким образом, рассматриваемая система синхронного суммирования лазерных импульсов обеспечивает значительное повышение эффективности исходного лазерного источника ( $\eta_{\text{пред}} = 9077$ ) без увеличения энергии электропитания. Проведенный в работе анализ указывает на возможность применения подобных систем в устройствах лазерной связи, лидарах, дальномерах и других системах специального назначения.

## Список литературы

1. Космическое оружие: дилемма безопасности / А. Г. Арбатов, А. А. Васильев, Е. П. Велихов, В. С. Верещетин ; под ред. Е. П. Велихова, Р. З. Сагдеева, А. А. Кокошина. – М. : Мир, 1986. – 182 с.
2. Пат. 2477553 Российская Федерация, МПК Н 01 S 3/10. Источник импульсного лазерного излучения / Алексеев В. А., Юран С. И., Перминов А. С., Стерхова М. А. – № 2011137390/28 ; заявл. 09.09.2011 ; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7.
3. *Никонов, Н. В.* Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна : учеб. пособие, курс лекций / Н. В. Никонов, А. И. Сидоров. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 130 с.
4. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы : сб. ст. / под ред. С. А. Дмитриева и Н. Н. Слепова. – М. : Техносфера, 2010. – 608 с.

*M. R. Zaripov*, assistant

E-mail: zaripov.istu@gmail.com

*V. A. Alekseev*, DSc in engineering, professor

*A. S. Perminov*, senior lecturer

*D. N. Shulmin*, degree applicant

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

## Increasing the Efficiency of Laser Systems

*The block diagram and the operating principle of the system are presented. That system provides a multiple increasing of the effectiveness of pulsed laser sources without increasing of the power supply energy. The graphical dependence of the energy effectiveness of the system on the number of optical delay lines is obtained. The maximum value of energy effectiveness and the number of delay lines are determined.*

**Keywords:** pulse energy, pulse amplitude, delay lines, energy effectiveness, optical fiber.

УДК 621.391

*И. А. Кайсина*, магистрант

*В. В. Титов*, студент

*Д. С. Васильев*, канд. техн. наук, инженер

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*Д. С. Мейтис*, инженер

НПО «Телеком»

*А. В. Абилов*, канд. техн. наук, доц.,

декан приборостроительного факультета

*А. Е. Кайсин*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: irinakaysina25@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Экспериментальное исследование эффективности протокола маршрутизации В.А.Т.М.А.Н. в сети с топологией точка-точка для FANET**

*Неудовлетворительное качество обслуживания является проблемой в сетях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Исследованные протоколы маршрутизации AODV и OLSR не повышают коэффициент доставки пакетов (PDR – Packet Delivery Ratio). Следовательно, необходимо рассматривать и изучать новые методы повышения качества обслуживания в таких сетях. Среди методов могут быть: сетевое кодирование, алгоритм повторной передачи на уровне приложений.*

**Ключевые слова:** самоорганизующаяся сеть беспилотных летательных аппаратов, FANET, В.А.Т.М.А.Н., сетевое кодирование, алгоритм повторной передачи, ARQ, топология точка-точка, качество обслуживания.

### **Введение**

Неудовлетворительное качество обслуживания является проблемой в сетях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1–3]. Авторами ранее были исследованы такие протоколы маршрутизации, как AODV и OLSR [4–6]. Для исследования применялось имитационное моделирование в среде ns-3, показанные результаты свидетельствуют о неудовлетворительной работе данных протоколов для FANET. Одним из путей повышения качества обслуживания в FANET является алгоритм повторной передачи на уровне приложений (AL-ARQ), который также был

---

© Кайсина И. А., Титов В. В., Васильев Д. С., Мейтис Д. С., Абилов А. В., Кайсин А. Е., 2018

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00218.

исследован авторами [7] ранее и улучшил показатели. Метод AL-ARQ может быть реализован не только совместно с протоколами AODV и OLSR, но и с другими протоколами маршрутизации для FANET.

Иным методом повышения качества обслуживания является метод сетевого кодирования (СК), который также был исследован авторами при помощи имитационного моделирования в ns-3. Сетевое кодирование направлено на повышение специфической метрики *coding gain*, которая показывает эффективность использования среды передачи, например, для Wi-Fi. СК действительно улучшало средний коэффициент доставки пакетов в наших исследованиях [8, 9]. Следующим этапом является практическая реализация сетевого кодирования и его экспериментальное исследование для сетей FANET. На сегодняшний день существует единственный протокол маршрутизации, в котором реализовано сетевое кодирование – В.А.Т.М.А.Н.

В данной статье мы представляем результаты экспериментального исследования протокола на самой простой топологии – точка-точка. В дальнейшем топологию можно усложнять: добавить ретранслятор (на котором реализовано сетевое кодирование) или рассмотреть вариант с несколькими источниками.

### Сведения из теории

В 2006 г. началась разработка протокола В.А.Т.М.А.Н. как альтернативы протоколу OLSR. В.А.Т.М.А.Н. является проактивным и использует дистанционно-векторный алгоритм маршрутизации. Как и OLSR, протокол В.А.Т.М.А.Н. реализован в виде отдельного процесса на пользовательском уровне операционной системы (ОС) и работает на сетевом уровне. Такая реализация протокола оказывала существенное влияние на производительность оборудования. По этой причине в 2007 г. была начата разработка протокола В.А.Т.М.А.Н Adv. Помимо переноса на уровень ядра ОС и предотвращения затратного процесса копирования пакетов в пользовательское пространство и обратно, новый протокол производит маршрутизацию на канальном уровне. Протокол В.А.Т.М.А.Н Adv. инкапсулирует весь трафик от входа до выхода, действуя как виртуальный коммутатор между узлами сети. Это позволяет использовать протоколы, отличные от IPv4, а также упрощает внедрение новых технологий.

В то время как некоторые другие протоколы маршрутизации просятывают всю топологию сети при выборе маршрута, В.А.Т.М.А.Н Adv. хранит только информацию о том, какой следующий шаг маршрутизации лучше для достижения адресата. Когда пакет принят очеред-

ным узлом, он снова выбирает лучший следующий шаг, ведущий к месту назначения [10, 11].

### Описание эксперимента

В В.А.Т.М.А.Н Adv. была реализована возможность сетевого кодирования (СК). Основная идея СК – увеличение пропускной способности беспроводной сети [11–20]. Применение данного метода дает возможность объединить несколько пакетов в один, а значит, уменьшить количество переданных данных. Для этого между сетевым и канальным уровнем вставляется специальный заголовок, позволяющий узлу определить возможность кодирования.

В статье представлены результаты экспериментального исследования передачи видеоданных от источника до адресата с использованием протокола В.А.Т.М.А.Н Adv. и без него (*ad-hoc*) по беспроводной связи Wi-Fi. Адресат располагался на первом этаже, а источник – на этажах здания со второго по десятый. На каждом этаже проводились замеры для стационарного и мобильного источника. Под мобильностью в статье понимается перемещение источника в ограниченной зоне без смены этажа.

Чтобы включить и настроить протокол В.А.Т.М.А.Н Adv., было необходимо выполнить следующие шаги:

- загрузить модуль протокола В.А.Т.М.А.Н Adv.;
- указать сетевой интерфейс, который будет использован для создания сети;
- создать виртуальный сетевой интерфейс `bat0`, чтобы связать протокол В.А.Т.М.А.Н Adv., работающий на втором уровне, с третьим уровнем модели OSI;
- задать IP-адрес для вновь созданного интерфейса;
- перезапустить службу `network-manager`, отвечающую за сетевые соединения в ОС Linux.

Эксперимент проводился в несколько этапов:

1. Передача потокового видео происходила с использованием протокола В.А.Т.М.А.Н Adv. На передатчике запускалась трансляция потокового видео с циклическим воспроизведением одного и того же файла через VLC. На узле-получателе Wireshark захватывал все пакеты, поступающие на сетевой интерфейс `wlan0`, который был указан во время настройки протокола В.А.Т.М.А.Н Adv. VLC осуществлял воспроизведение поступающего потокового видео. Получатель размещался на лестничной площадке первого этажа пятого корпуса ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, узел-источник перемещался со второго до десятого этажа (высота этажа составляет 3 метра). Первый вариант эксперимента

предполагал статическое положение узла источника, второй вариант предполагал мобильность узла источника. Под мобильностью предполагалось движение по периметру квадрата со стороной два метра, со скоростью 4–5 км/ч. Каждое измерение проводилось 6 раз и записывалось как лог-файл в Wireshark.

2. Все шаги, описанные в первом пункте, проводились без протокола В.А.Т.М.А.Н.

### Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности В.А.Т.М.А.Н. была выбрана метрика – коэффициент доставки пакетов ( $PDR$ ).  $PDR$  – это отношение количества принятых пакетов к количеству переданных пакетов, которое рассчитывается по формуле:

$$PDR = \frac{\text{Количество принятых пакетов}}{\text{Количество отправленных пакетов}}. \quad (1)$$

По результатам экспериментов был измерен средний коэффициент доставки пакетов ( $PDR_{ave}$ ). Для его получения все полученные значения  $PDR$  усреднялись. На рис. 1 изображен график сравнения среднего коэффициента доставки пакетов в режиме ad-hoc со статической маршрутизацией при стационарном (статика ad-hoc) и мобильном источнике (динамика ad-hoc), а на рис. 2 представлены результаты с работающим протоколом В.А.Т.М.А.Н.

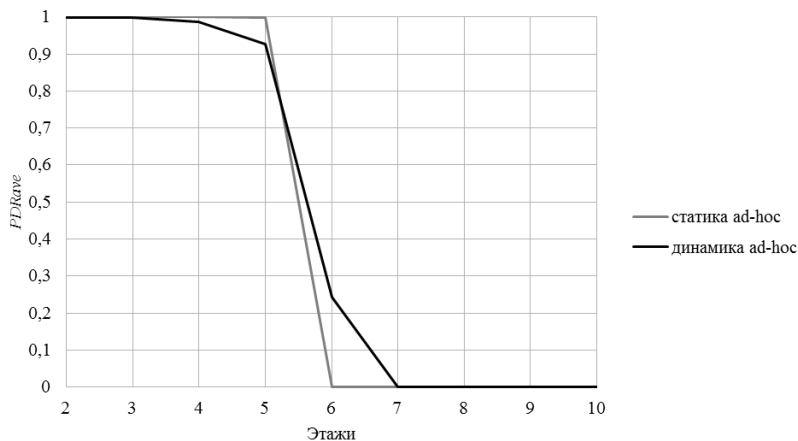


Рис. 1. Зависимость  $PDR_{ave}$  от этажа без В.А.Т.М.А.Н.

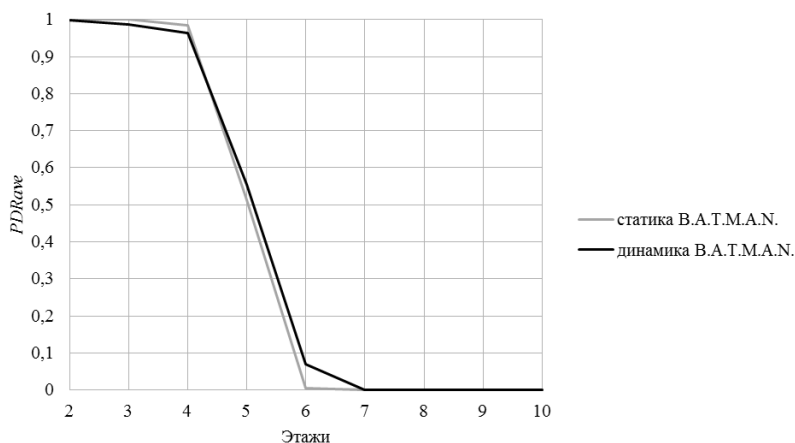


Рис. 2. Зависимость  $PDR_{ave}$  от этажа с В.А.Т.М.А.Н.

На рис. 1 можно видеть, что значения  $PDR_{ave}$  при отсутствии движения до 4-го этажа равны 1. На высоте 15 м коэффициент снижается до 0,99 (на 5-м этаже) и достигает значения 0 на 6-м этаже. При движении источника значения среднего коэффициента доставки пакетов несколько ниже до 5-го этажа, но на 6-м этаже значение  $PDR_{ave}$  равняется 0,24.

Все полученные результаты В.А.Т.М.А.Н. начинаются ухудшаться с 4-го этажа, на 7-м этаже связь с приемником теряется.

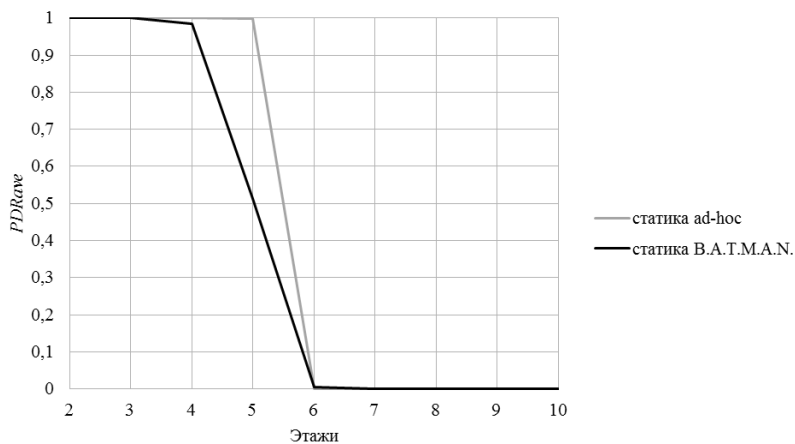


Рис. 3. Зависимость  $PDR_{ave}$  статика для ad-hoc и В.А.Т.М.А.Н.

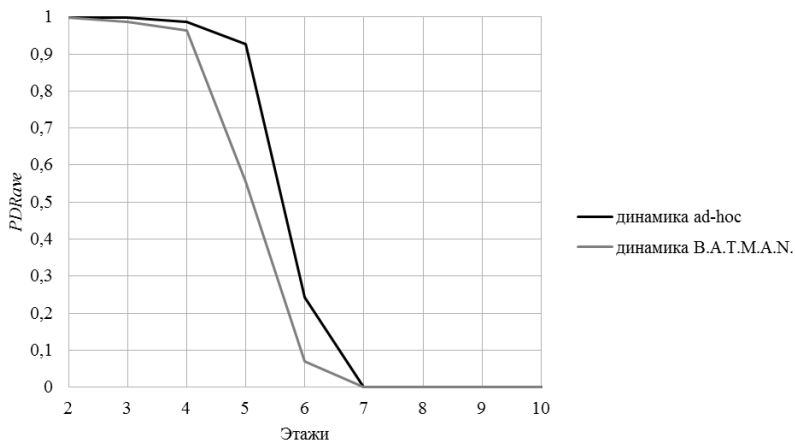


Рис. 4. Зависимость  $PDR_{ave}$  динамика для ad-hoc и В.А.Т.М.А.Н.

На рис. 3 видно, что полученные значения среднего коэффициента доставки пакетов у протокола В.А.Т.М.А.Н. хуже. Но связь источника и получателя не обрывается до 7-го этажа с работающим протоколом ( $PDR_{ave}$  на 7-м этаже равен 0,004). Если сравнивать результаты с мобильностью источника, то на 6-м этаже  $PDR_{ave}$  без протоколов маршрутизации равен 0,24, с протоколом В.А.Т.М.А.Н. – 0,069. Стоит отметить, что количество отправленных пакетов при работе протокола было выше, что связано с наличием алгоритма повторных передач в В.А.Т.М.А.Н.

## Выводы

В статье дано краткое описание протокола маршрутизации В.А.Т.М.А.Н., а также проведено его экспериментальное исследование. Его эффективность оценена с помощью среднего коэффициента доставки пакетов и сравнивается с передачей данных со статической маршрутизацией. В топологии точка-точка результаты протокола ниже, чем при работе сети в режиме ad-hoc со статической маршрутизацией. Это связано с тем, что статическая маршрутизация для беспроводной сети Wi-Fi является очень простым и надежным методом доставки пакетов до узлов в зоне радиослышимости. Она заключается в определении узла-адресата с помощью протокола ARP и широковещании всех пакетов с беспроводного интерфейса к этому адресату. Напротив, протокол маршрутизации В.А.Т.М.А.Н. является проактивным и использует дополнительные управляющие сообщения для построения маршрутов, что



негативно сказывается на его эффективности при использовании в нестабильных каналах связи с потерями более 1 % пакетов. Преимуществом В.А.Т.М.А.Н. перед статической маршрутизацией является его применимость для создания самоорганизующихся сетей и использование промежуточных узлов для ретрансляции данных. Дальнейшие исследования необходимо проводить в сети с ретранслятором, на котором может функционировать метод сетевого кодирования. Также могут быть рассмотрены варианты сети с несколькими источниками и одним получателем.

### Список литературы

1. Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, И. А. Богданов, А. А. Дорт-Гольц // *Электросвязь*. – 2014. – № 9. – С. 2–5.
2. *Bekmezci, I.* Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey / I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, Ş. Temel // *Ad Hoc Networks*. – 2013. – Vol. 11, no. 3. – Pp. 1254–1270.
3. *Sahingoz, O. K.* Networking models in flying ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2014. – Vol. 74, no. 1–2. – Pp. 513–527.
4. *Кайсина, И. А.* Анализ эффективности протоколов маршрутизации OLSR и AODV в летающей сети FANET / И. А. Кайсина, Д. С. Васильев, А. В. Абилов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 87–90.
5. *Васильев, Д. С.* Протоколы маршрутизации в MANET / Д. С. Васильев, А. В. Абилов // *Электросвязь*. – 2014. – № 11. – С. 52–54.
6. *Vasiliev, D. S., Meitis, D. S., Abilov, A.* Simulation-based comparison of AODV, OLSR and HWMP protocols for flying Ad Hoc networks / D. S. Vasiliev, D. S. Meitis, A. Abilov // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems* / S. Balandin, S. Andreev, Y. Koucheryavy (eds.). – Cham : Springer, 2014. – Pp. 245–252.
7. *Abilov, A.* Priority retransmission in AL-ARQ for MPEG streaming over WLAN / A. Abilov, A. Chunaev, D. Vasiliev // *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. – Omsk, Russia, 21–23 May 2015. – Omsk : IEEE, 2015. – Pp. 1–6.
8. *Кайсина, И. А.* Сетевое кодирование в сетях FANET / И. А. Кайсина, Д. С. Васильев, А. В. Абилов // *Электросвязь*. – 2018. – № 1. – С. 64–68.
9. *Vasiliev, D. S., Kaysina, I. A., Abilov, A.* Performance evaluation of COPE-like network coding in flying ad hoc networks: simulation-based study // *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 17th International Conference, NEW2AN 2017, 10th Conference, ruSMART 2017, Third Workshop NsCC 2017, St. Petersburg, Russia, August 28–30, 2017, Proceedings* / O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin, Y. Koucheryavy (eds.). – Cham : Springer, 2017. – Pp. 577–586.
10. *Jungic, D.* A better approach to mobile ad hoc networking [Slides]. – 2011.

11. Better approach to mobile ad-hoc networking (BATMAN) : Internet-Draft (March 30, 2008) / A. Neumann, C. Aichele, M. Lindner, S. Wunderlich. – IETF, 2008. – 24 p.

12. XORs in the air: practical wireless network coding / S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Médard, J. Crowcroft // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – Vol. 36, no. 4. – Pp. 243–254.

13. Wu, Y. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding / Y. Wu, P. A. Chou, S. Y. Kung // IEEE Transactions on Communications. – 2005. – Vol. 53, no. 11. – Pp. 1906–1918.

14. Codecast: a network-coding-based ad hoc multicast protocol / J.-S. Park, M. Gerla, D. S. Lun, Y. Yi, M. Medard // IEEE Wireless Communications. – 2006. – Vol. 13, no. 5. – Pp. 76–81.

15. Performance of network coding in ad hoc networks / J. S. Park, D. S. Lun, F. Soldo, M. Gerla, M. Médard // Military Communications Conference, 2006 (MILCOM 2006). – IEEE, 2006. – Pp. 1–6.

16. Ngai, C. K. Network coding gain of combination networks / C. K. Ngai, R. W. Yeung // Information Theory Workshop (24–29 Oct. 2004, San Antonio, USA). – IEEE, 2004. – Pp. 283–287.

17. Novel concepts for device-to-device communication using network coding / P. Pahlavani, M. Hundeboll, M. Pedersen, D. Lucani, H. Charaf, F. Fitzek, H. Bagheri, M. Katz // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52. – Pp. 32–39.

18. Vieira, L. F. M. Fundamental limits on end-to-end throughput of network coding in multi-rate and multicast wireless networks / L. F. M. Vieira, M. Gerla, A. Misra // Computer Networks. – 2013. – Vol. 57. – Pp. 3267–3275.

19. Goseling, J. Random access with physical layer network coding / J. Goseling, M. Gastpar, J. H. Weber // IEEE Transactions on Information Theory. – 2015. – Vol. 61. – Pp. 3670–3681.

20. Understanding practical limitations of network coding for assisted proximate communication / A. Pyattaev, O. Galinina, S. Andreev, M. Katz, Y. Koucheryavy // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2015. – Vol. 33. – Pp. 156–170.

---

I. A. Kaysina, magister student  
V.V. Titov, student  
D. S. Vasiliev, CSc in engineering, engineer  
D. S. Meitis, engineer  
A. V. Abilov, CSc in engineering, associate professor  
A. E. Kaisin, CSc in engineering, associate professor  
E-mail: irinakaysina25@gmail.com  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Experimental-Based Study of B.A.T.M.A.N. Protocol in Point-to-Point Topology for FANET**

*Unsatisfactory quality of service (QoS) is a major problem in FANETs (Flying Ad hoc Networks). The investigated routing protocols AODV and OLSR showed low packet delivery ratios. Therefore, it is necessary to consider new methods of improving the quality of service in such networks. We could use network coding or AL-ARQ (Application Layer Automatic Repeat-reQuest) to improve QoS metrics. That is why we have to study the routing protocol, in which such methods (e.g. Network Coding) are embedded – B.A.T.M.A.N.*

**Keywords:** flying ad-hoc network, BATMAN, network coding, automatic repeat request, point-to-point topology, quality of service.

УДК 539.261

С. М. Мокрова, мл. науч. сотр.

В. Н. Милич, канд. техн. наук, зав. отделом

E-mail: lssm@ftiudm.ru

ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», г. Ижевск

## **Анализ текстуры сплавов никеля с палладием при создании лент-подложек сверхпроводников второго поколения**

*В статье рассматривается процесс формирования металлических лент-подложек с острой кубической текстурой для создания сверхпроводников. Описан алгоритм анализа текстуры материала, основанный на объектно-векторном представлении плоскостей отражения. Для каждой найденной ориентации кристаллитов вычисляется параметр достоверности, что позволяет определить наиболее вероятные ориентации в образце. Приведены результаты исследования образцов никелевых сплавов, у которых определен уровень совершенства однокомпонентных текстур.*

**Ключевые слова:** сверхпроводники, текстурный анализ, прямая полюсная фигура, однокомпонентная текстура, показатель достоверности ориентации.

### **Введение**

В конце прошлого века появились технологии получения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения, для производства которых необходима металлическая лента-подложка с высокой степенью совершенства кубической текстуры  $\{100\}\langle 001\rangle$ . Значение критического тока, являющееся основной характеристикой ленточных многослойных высокотемпературных сверхпроводников, значительно зависит от остроты кристаллографической текстуры в материале сверхпроводника, наследуемой от кубической текстуры металлической подложки [1]. Также для производства длинных лент материал подложки должен обладать высокими прочностными свойствами. Таким условиям удовлетворяют текстурированные ленты из Ni и сплавов на его основе. В работе [2] показано, что лента из сплава никеля, полученная путем холодной прокатки и последующего отжига, позволяет получить материал сверхпроводника с уменьшенными значениями магнитной проницаемости и повышенной механической прочностью, что увеличивает значение критического тока в сверхпроводнике.

Для получения необходимой острой текстуры поликристаллический брусок со случайной ориентацией зерен прокатывают до степени де-

формации 99 %, затем отжигают при температуре 600–1400 °С в условиях высокого вакуума или атмосфере 96 % Ag + 4% H [3]. Материал, полученный в результате текстурирования, напоминает мозаичный кристалл и состоит из зерен размером 30–50 мкм, разориентированных на небольшие углы, с границами между зернами глубиной ~30 нм. Текстура материала значительно зависит от условий деформации и отжига. Поэтому разработка методов исследования текстуры материалов подложки является актуальной задачей.

### **Постановка задачи**

Для того чтобы описать текстуру материала подложки, необходимо получить информацию об объеме кристаллитов (зерен) отдельных текстурных компонент и их пространственном положении – ориентации. Эта информация может быть получена из прямых полюсных фигур (ППФ). На ППФ отображаются интенсивности отраженного рентгеновского луча от кристаллографических плоскостей кристаллитов, удовлетворяющих условию Вульфа – Брегга, как функция полярного и азимутального углов [4].

Задача анализа текстуры по ППФ состоит в том, чтобы распределить объем ППФ между различными ориентациями, по ним получить текстурные компоненты и определить их параметры. В работе [5] описан предложенный авторами алгоритм определения списка возможных ориентаций в поликристалле. Метод подходит для анализа как острых, так и гладких текстур и нацелен на получение максимально возможной информации о текстурном состоянии непосредственно из прямых полюсных фигур, содержащих первичную информацию об ориентациях кристаллитов и зерен в поликристаллических объектах.

### **Решение задачи**

Предлагаемый алгоритм [5] анализа ППФ состоит из нескольких этапов, а также нескольких дополнительных процедур для проверки полученных результатов. Предварительно производится дискретизация ППФ, точность которой определяется шагом сетки Болдырева. Далее выполняется квантование значений интенсивности, после чего строится объемная 3D-модель ППФ. На первом этапе производится поиск всех возможных ориентаций, присутствующих на ППФ. Вторым этапом метода является процедура по удалению повторяющихся ориентаций, после которой все ориентации являются уникальными, и их количество уменьшается. На третьем этапе производится выбор достоверных ориентаций из массива всех найденных ориентаций таким образом, чтобы сумма значений интенсивности полюсов выбранных ориентаций равня-

лась объему ППФ. Показатель достоверности ориентации вычисляется из значений параметров узлов сетки дискретной модели ППФ, относящихся к полюсам выбранной ориентации, и определяет вероятность, с которой ориентация присутствует в образце [6]. Параметр узла сетки в свою очередь зависит от значений интенсивности в узле и количества ориентаций, найденных на первом этапе метода, к которым этот узел относится. Из значений интенсивности 3D-модели ППФ, соответствующих полюсам ориентации с максимальным показателем достоверности, вычитается один уровень. Процедура пересчета показателей достоверности и выбора наиболее достоверной ориентации повторяется, пока остаются ориентации, у которых все полюса имеют ненулевую интенсивность. Для проверки качества анализа текстуры по полученным данным восстанавливаются ППФ, которые сравниваются с экспериментальными ППФ с помощью RP-фактора.

### Результаты и их обсуждение

Для верификации предложенного метода был проведен текстурный анализ сплавов никеля с палладием для эпитаксиальных подложек ленточных высокотемпературных сверхпроводников [7].

На рис. 1 представлены полюсные фигуры  $\{111\}$  лент сплава Ni<sub>94</sub>Pd<sub>6</sub>, прокатанных со степенью деформации 98,3 %, 98,5 %, 98,7 % соответственно и отожженных при 1000 °С в течение одного часа.

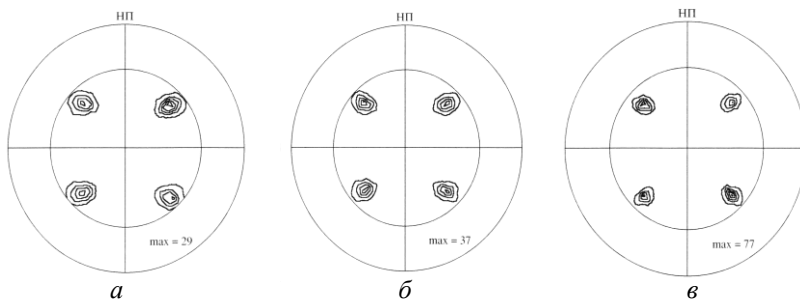


Рис. 1. Полюсные фигуры  $\{111\}$  сплава Ni<sub>94</sub>Pd<sub>6</sub> при деформации 98,3 % (а); 98,5 % (б); 98,7 % (в)

При визуальной оценке ППФ видно, что в образцах сформирована структура, в которой у большинства кристаллитов ориентации близки между собой, а все они близки к идеальной ориентации  $\{001\}\langle 100\rangle$ . Причем с увеличением степени деформации области повышенной ин-

тенсивности уменьшаются, что свидетельствует о повышении степени совершенства текстуры  $\{001\}\langle 100\rangle$ . Для получения количественных оценок остроты текстуры необходимо провести компьютерный анализ данных ППФ.

На рис. 2 представлены полюсные фигуры  $\{100\}$ , восстановленные с использованием метода [5] по исходным ППФ  $\{111\}$ . На ППФ  $\{100\}$  отражены ориентации кристаллических объемов образца ортогональными осями кубической решетки. По положению полюсов семейства  $\{100\}$  на рис. 2 очевидно, что в образцах кристаллиты имеют ориентацию, близкую к  $\{001\}\langle 100\rangle$ . Кроме восстановления ППФ  $\{100\}$ , использование методов и составленных программ для анализа прямых полюсных фигур позволяет рассчитать количественные оценки не только преимущественных ориентаций, но и других, менее представленных.

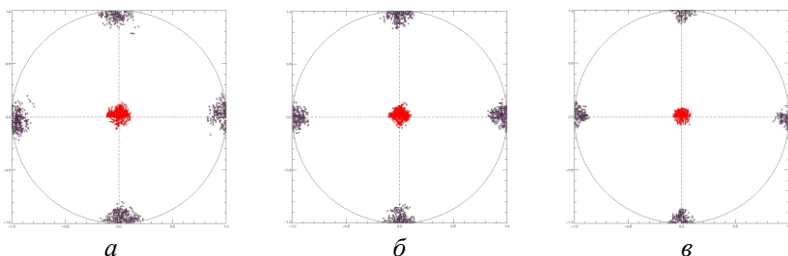


Рис. 2. Восстановленные ориентации  $\{001\}\langle 100\rangle$  для образцов из  $\text{Ni}_{94}\text{Pd}_6$  при деформации 98,3 % (а); 98,5 % (б); 98,7 % (в)

На рис. 3 представлены результаты такого количественного анализа. На гистограмме представлены распределения ориентаций в зависимости от угла разориентации относительно идеальной ориентации  $\{001\}\langle 100\rangle$  для всех трех образцов. Синим цветом отображено распределение для образца со степенью деформации 98,3 %, красным цветом – 98,5 %, зеленым цветом – 98,7 %. По оси абсцисс отложен угол разориентации кристаллитов относительно  $\{001\}\langle 100\rangle$  в градусах; по оси ординат – рассчитанные значения ориентаций в процентах от общего найденного количества ориентаций.

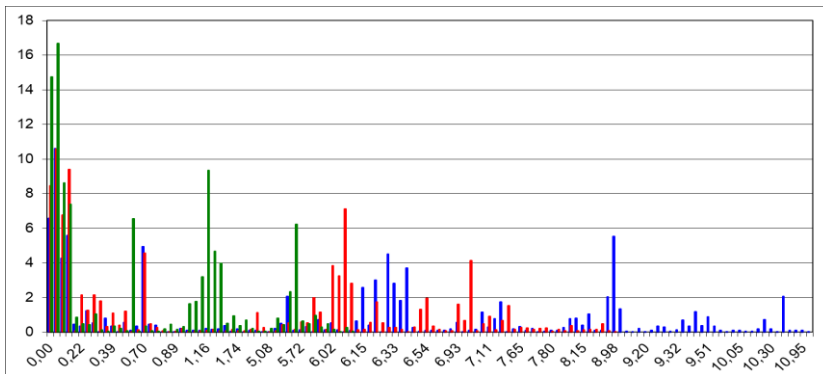


Рис. 3. Гистограмма пространственного распределения кристаллитов в образцах из  $Ni_{94}Pd_6$  для степеней деформации 98,3 % (синий цвет), 98,5 % (красный цвет), 98,7 % (зеленый цвет)

При сравнении гистограмм можно заметить, что при минимальном обжатии 98,3 % текстура более рассеянная, можно выделить несколько пиков, характеризующих однонаправленные группировки кристаллитов. С увеличением степени обжатия (зеленый цвет) в материале формируются более крупные группы кристаллитов, углы разориентации которых стремятся к нулю. В образце с максимальной степенью обжатия около 60 % объема кристаллитов (зерен) отклонены от идеальной ориентации  $\{001\}\langle 100 \rangle$  не больше, чем на  $1,5^\circ$ . Часть кристаллитов, около 40 %, отклонена от идеальной ориентации на углы от  $6^\circ$  до  $9^\circ$ . Интересно отметить, что в образцах распределение по углам отклонения от идеальной ориентации  $\{001\}\langle 100 \rangle$  близко к бимодальному.

Также из табл. 1 видно, что во всех трех сплавах  $Ni_{94}Pd_6$  отклонение ориентаций основной части зерен не превышает десяти градусов. С повышением степени обжатия при прокатке доля таких зерен возрастает с 88,95 % при деформации 98,3 % до 96,64 % при обжатии 98,5 % и до 99,85 % при деформации 98,7 %. В целом можно сказать, что текстура во всех трех образцах близка к идеальной с разной степенью совершенства, которое можно оценить количеством ориентаций кристаллитов, угол разориентации которых близок к нулю. Диаграмма на рис. 4 отображает данные, приведенные в таблице. Цвета столбцов на диаграмме соответствуют цветам столбцов гистограммы на рис. 3.



**Распределения ориентаций в зависимости от угла разориентации**

Степень деформации	Угол разориентации с $\{001\}\langle 100\rangle$ , %			
	$<1,5^\circ$	$1,5-5^\circ$	$5-10^\circ$	$>10^\circ$
98,3 %	38,67	1,08	49,2	11,05
98,5 %	51,71	0,45	44,48	3,36
98,7 %	58,29	0	41,36	0,35

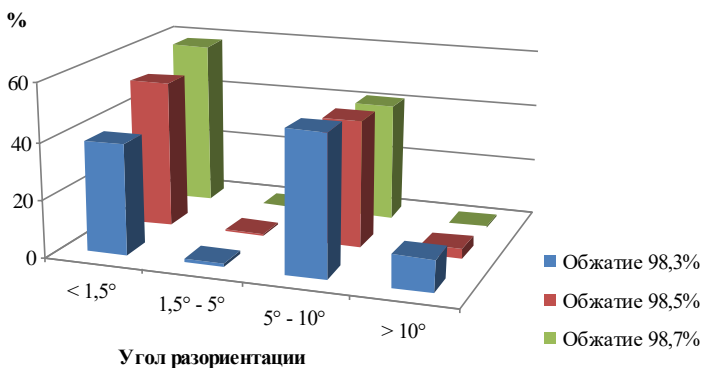


Рис. 4. Диаграмма распределения ориентаций в зависимости от угла разориентации относительно с  $\{001\}\langle 100\rangle$

**Выводы**

Использование метода анализа текстуры на основе объектно-векторного представления плоскостей отражения с использованием показателя достоверности ориентации позволяет получить распределение ориентаций по одной неполной ППФ даже в однокомпонентной текстуре. Это дает возможность более точно анализировать текстуру материала, выделять мелкие текстурные компоненты, объем которых показывает степень совершенства данной однокомпонентной текстуры. Полученные результаты можно использовать при подборе оптимальных режимов обработки материала для получения острой кубической текстуры, необходимой для создания подложек сверхпроводников.

**Список литературы**

1. Cube-textured nickel substrate for high-temperature superconductors / E. D. Specht, A. Coyal, D. F. Lee, F. A. List, D. M. Kroeger, M. Paranthaman, R. K. Williams, D. K. Christen // Superconductors Science and Technology. – 1998. – Vol. 11, no. 10. – Pp. 945–949.

2. Textured Ni–7.5 at.% W substrate tapes for YBCO-coated conductors / J. Eickemeyer, R. Hühne, A. Güth, C. Rodig, H. Klauß, B. Holzapfel // *Superconductors Science and Technology*. – 2008. – Vol. 21, no. 10. – Pp. 1–7.

3. High critical current density superconductors tapes by epitaxial deposition of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  thick films on biaxially textured metals / A. Coyal, D. P. Norton, J. D. Budai et al. // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 69, no. 12. – Pp. 1795–1797.

4. *Бородкина, М. М.* Рентгенографический анализ текстуры в металлах и сплавах / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – М. : Металлургия, 1982. – 272 с.

5. *Мокрова, С. М.* Определение структуры поликристаллических материалов с помощью алгоритма объектно-векторного представления плоскостей отражения и визуализация результатов в пространстве Родрига / С. М. Мокрова, Р. П. Петров, В. Н. Милич // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. – 2016. – Т. 26, вып. 3. – С. 336–344.

6. *Мокрова, С. М.* Алгоритм выбора достоверных ориентаций при расшифровке данных рентгенодифракционного анализа / С. М. Мокрова, В. Н. Милич // *Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.)*. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – С. 711–719.

7. Образование кубической текстуры в сплавах никеля с палладием для эпитаксиальных подложек ленточных высокотемпературных сверхпроводников / И. В. Гервасьева, Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова, Н. Ф. Вильданова, А. С. Штырлов, Г. А. Досовицкий, А. Р. Кауль // *Физика металлов и металлоредение*. – 2007. – Т. 103, № 6. – С. 633–641.

*S. M. Mokrova*, junior researcher

*V. N. Milich*, CSc in engineering, head of division

E-mail: lssm@ftiudm.ru

Physical-Technical Institute UB RAS, Izhevsk, Russia

## **Texture Analysis of Nickel-Palladium Alloys to Create Substrates for Type-II Superconductors**

*The article deals with the process of forming of metal tapes with a sharp cubic texture for creation of type-II superconductors. A textural analysis algorithm of a material using one incomplete direct pole figure is based on the object-vector representation of the reflection planes. For each found crystallite orientations a reliability parameter is calculated. It allows to determine the most probable orientations in the sample. The results of the study of nickel alloys samples are given. For each of them the level of perfection of one-component texture is determined.*

**Keywords:** superconductors, analysis of the texture, direct pole figure, one-component texture, factor of the orientation reliability.

---

УДК 004.67:616.073

*А. С. Перминов*, ст. преподаватель

E-mail: perminovac@mail.ru

*С. И. Юран*, д-р техн. наук, проф.

E-mail: yuran-49@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Подготовка базы данных фотоплетизмограмм**

*В работе описана методика подготовки базы данных эталонов фотоплетизмограмм, искаженных артефактами различной природы. В результате проведенных экспериментальных исследований по регистрации и обработке фотоплетизмограмм с помощью разработанной программы, которая позволяет выделять пульсовые кривые с артефактами, подготовлены фотоплетизмограммы с различным уровнем артефактов. Полученные кривые можно использовать для тестирования аппаратной части фотоплетизмографов и его программного обеспечения.*

**Ключевые слова:** артефакты, база данных, тестирование фотоплетизмографа, фотоплетизмограмма.

### **Введение**

Важной является задача построения автоматизированной аппаратуры для фотоплетизмографии [1–7], обеспечивающая снижение влияния артефактов при регистрации и обработке фотоплетизмограмм и позволяющая получить объективную информацию о гемодинамике исследуемого биологического объекта. Для ее решения необходимо создание базы данных эталонов фотоплетизмограмм, искаженных артефактами различной природы.

В работе описана методика создания базы данных эталонов фотоплетизмограмм для обеспечения автоматизации их контроля в условиях артефактов.

### **Описание эксперимента**

План проведения экспериментов при создании базы данных состоял в следующем.

Регистрация фотоплетизмограмм осуществлялась с помощью разработанного автоматизированного фотоплетизмографа [8]. Для создания эталонов фотоплетизмограмм, искаженных артефактами, в экспериментах использовались два типа оптоэлектронных датчиков, широко при-

меняемых в фотоплетизмографии [7]. Первый датчик – трансмиссионный, совместимый со стандартом Nellcor (рис. 1, *а*), второй – планарный (рис. 1, *б*). Планарный датчик при креплении его, например, с помощью ленты велкро больше подвержен влиянию таких артефактов, как вариабельность усилия прижатия датчика, перекос его установки на биологическом объекте, смещение относительно начальной точки установки. В то же время трансмиссионный датчик в большей степени свободен от такого вида артефактов, т. к. материал (мягкий силикон) и форма датчика способствуют правильному и надежному его креплению на первой фаланге пальца.

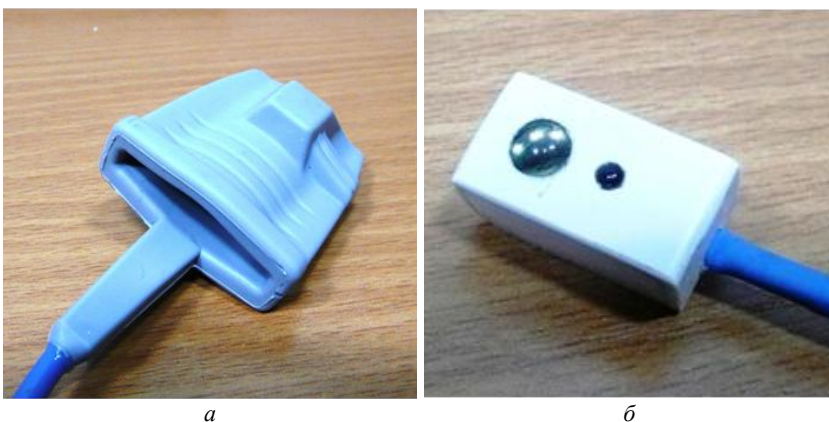


Рис. 1. Внешний вид оптоэлектронных датчиков с инфракрасной оптопарой: трансмиссионный (*а*); планарный (*б*)

Время регистрации пульсовых кривых составляло от 30 до 60 с, что достаточно для использования реализации такой длительности в программах по тестированию автоматизированных фотоплетизмографов.

Поскольку при регистрации фотоплетизмограмм используется относительно высокая частота дискретизации, равная 1 кГц, файл с записанными пульсовыми кривыми может содержать повторяющиеся несколько раз одни и те же значения отсчетов сигнала, особенно на пологих участках кривой. Для уменьшения времени обработки кривых предусмотрено прореживание отсчетов в требуемое число раз. Для этого производится настройка параметров прореживания.

Зарегистрированные пульсовые кривые обрабатывались с помощью разработанной программы выявления артефактов и подсчета относительного содержания кривых, искаженных артефактами [9].

Исключение артефактных кривых производится путем поиска значений фотоплетизмограмм, выходящих за пределы заданного оператором допуска по амплитуде ( $X$ ) и длительности периода пульсовой кривой ( $t$ ).

В результате обработки артефактные части графика выделяются красным цветом, а пригодные для последующей работы – зеленым (рис. 2).

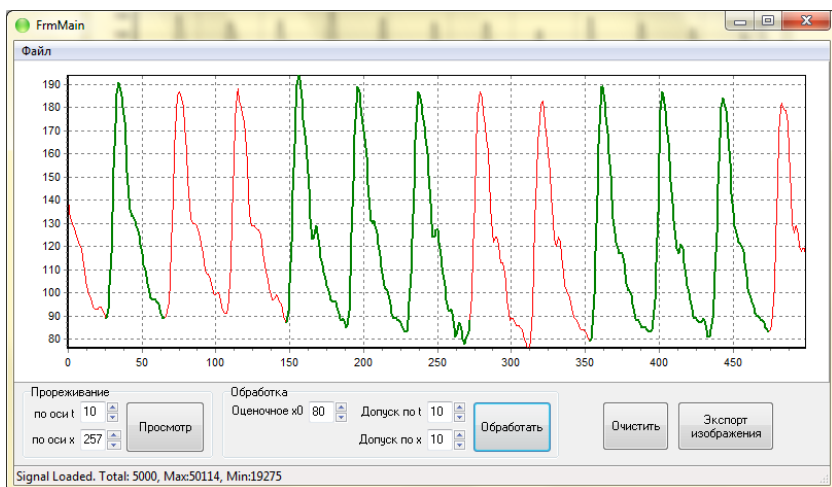


Рис. 2. Сигнал фотоплетизмограмм после обработки

После проведения экспериментов для удобства формирования базы данных эталонов фотоплетизмограмм, искаженных артефактами, полученные данные были занесены в таблицы.

В табл. 1 приведены результаты обработки фотоплетизмограмм, где относительное содержание «годных» пульсовых кривых является основным критерием построения базы данных.

В табл. 2 приведен список респондентов, участвовавших в экспериментах.

**Таблица 1. Фрагмент таблицы результатов обработки фотоплетизмограмм**

Имя файла	Прореж. по		Оценочное <i>X</i>	Допуск по		Годных отсчетов	Длина сигнала	Отброшено	Процент годных
	<i>T</i>	<i>X</i>		<i>T</i>	<i>X</i>				
1-63-52.plz	20	257	60	30	30	28	29832	7124	76,12
2-22-82.plz	20	257	60	30	30	72	30177	1505	95,01
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
49-21-83.plz	20	257	60	30	30	69	30043	2754	90,83
50-20-86.plz	20	257	60	30	30	53	29734	5361	81,97

**Таблица 2. Фрагмент таблицы с перечнем испытуемых**

№ испытуемого	Имя файла	Фамилия, инициалы	Возраст	Дата	Время
1	1-63-52.plz	Степанов С. И.	63	03.06.2017	11:38
2	2-22-82.plz	Рахимова А. Д.	22	03.06.2017	11:43
...	...	...	...	...	...
49	49-21-83.plz	Жукова И. Г.	21	06.06.2017	12:16:18
50	50-20-86.plz	Дмитриев К. А.	20	06.06.2017	12:16:42

### Результаты и их обсуждение

В табл. 3 приведено содержание полученной базы данных эталонов фотоплетизмограмм с наличием артефактов различного уровня.

**Таблица 3. Фрагмент таблицы сформированной базы данных эталонов фотоплетизмограмм**

№ п/п	Номер группы	Значения параметра, %	Имя файла	Кол-во ФПГ
1	A-30	0–30	8-20-62.plz ... 45-24-68.plz	8
2	A-50	31–50	5-24-86.plz ... 47-22-70.plz	13
3	A-70	51–70	6-24-79.plz ... 44-25-83.plz	10
4	A-90	71–90	1-63-52.plz ... 50-20-86.plz	13
5	A-100	Больше 90	2-22-82.plz ... 49-21-83.plz	6

Основой системы является реляционная база данных, предназначенная для хранения параметров фотоплетизмограмм [10]. Структура и программное обеспечение этой базы данных позволяет упростить хранение и систематизацию результатов экспериментов, направленных на формирование накопленной базы данных фотоплетизмограмм с артефактами, например, выбирать фотоплетизмограммы с заданным уровнем артефактов или зарегистрированные в определенное время у определенного пациента и др.

### Выводы

Сформированная база данных может лечь в основу методики тестирования как аппаратной части фотоплетизмографов, так и его программного обеспечения, например, для оценки методов, алгоритмов и конструкций оптоэлектронных датчиков, обеспечивающих снижение влияния артефактов, обусловленных оптическими помехами, дыхательными волнами, движением биологического объекта и др. В результате может быть повышена точность вычисления гемодинамических показателей, а значит, и качество диагностики сердечно-сосудистой системы. Полученные данные могут использовать и специалисты, разрабатывающие алгоритмы диагностики состояния сосудистой системы по пульсовым кривым.

### Список литературы

1. *Allen, J.* Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement // *Physiological Measurement*. – 2007. – Vol. 28, no. 3. – Pp. 1–39.
2. *Федотов, А. А.* Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга : учеб. пособие / А. А. Федотов, С. А. Акулов. – М. : Радио и связь, 2013. – 250 с.
3. *Рангайян, Р. М.* Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / пер. с англ. под ред. А. П. Немирко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 с.
4. *Федотов, А. А.* Реализация аппаратно-программной фильтрации в измерительном преобразователе сигнала артериальной пульсации крови / А. А. Федотов, С. А. Акулов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. – 2014. – № 1 (43). – С. 222–228.
5. *Десова, А. А.* Исследование структуры пульсового сигнала лучевой артерии на базе информации о его спектральном составе / А. А. Десова, А. А. Дорофеюк, В. В. Гучук // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
6. *Файзрахманов, Р. А.* Методы диагностики сердечно-сосудистых заболеваний с использованием пульсовых сигналов / Р. А. Файзрахманов, А. С. Мехоношин // *Вестник ПНИПУ*. – 2010. – № 10. – С. 79–88.

7. *Алексеев, В. А.* Проектирование устройств регистрации гемодинамических показателей животных на основе метода фотоплетизмографии : монография / В. А. Алексеев, С. И. Юран. – Ижевск : ИжГТУ ; ИжГСХА, 2006. – 248 с.

8. *Алексеев, В. А.* Автоматизированный фотоплетизмограф / В. А. Алексеев, С. А. Ардашев, С. И. Юран // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1 (6). – С. 46–51.

9. Программа для просмотра и редактирования фотоплетизмограмм / В. А. Алексеев, Г. С. Варзегов, К. И. Дизендорф, С. И. Юран // Лазеры. Измерения. Информация : сб. докл. 21-й Междунар. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – Т. 3. – С. 118–125.

10. *Алексеев, В. А.* Выделение приоритетных параметров для базы данных пульсовых кривых / В. А. Алексеев, А. А. Дюпин, С. И. Юран // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 253–257.

*A. S. Perminov*, senior lecturer

E-mail: perminovac@mail.ru

*S. I. Yuran*, DSc in engineering, professor

E-mail: yuran-49@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Preparation of the Database of Photoplethysmograms**

*In work the technique of preparation of the database of standards of the photoplethysmograms distorted by artifacts of various nature is described. As a result of the conducted experimental researches on registration and processing of photoplethysmograms by means of the developed program which allows to allocate pulse curves with artifacts photoplethysmograms with various level of artifacts are prepared. The received curves can be used for testing of the hardware of photoplethysmographs and his software.*

**Keywords:** artifacts, database, photoplethysmograph testing, photoplethysmogram.



---

УДК 621.372

*О. В. Пономарева*, д-р техн. наук, проф.

*А. В. Пономарев*, канд. экон. наук

*В. А. Пономарев*, д-р техн. наук, проф.

*Н. В. Смирнова*, канд. техн. наук, инженер

E-mail: ponva@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Обобщение прямого дискретного преобразования Фурье

*В работе исследованы вопросы развития прямого дискретного преобразования Фурье (прямое ДПФ) как основы классического дискретного спектрального анализа сигналов. Дан анализ эффективности и улучшения характеристик классического дискретного спектрального анализа сигналов известными методами модификации исходного дискретного сигнала. Рассмотрено обобщение прямого ДПФ в виде прямого параметрического дискретного преобразования Фурье (прямое ДПФ-П). Приведены аналитические свойства базисов прямого ДПФ и прямого ДПФ-П. Рассмотрена взаимосвязь известных методов модификации исходного дискретного сигнала с параметрическим ДПФ.*

**Ключевые слова:** базис, прямое дискретное преобразование Фурье, параметрическое дискретное преобразование Фурье.

### Введение

Одним из основных направлений применения методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) является классический дискретный спектральный анализ (КДСА) на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [1–31]. КДСА сигналов имеет широкий круг приложений во многих областях науки и техники: общей и музыкальной акустике [6, 7], сейсмологии и метеорологии [8, 9], виброакустической функциональной диагностике и акустической динамике машин [10–23], гидроакустике [2–5] и т. п.

В настоящее время в области спектральной цифровой обработки сигналов (СЦОС) можно выделить следующие основные направления научных и прикладных исследований [1–5]:

– классические методы спектральной ЦОС (СЦОС) (корреляционный, векторный и спектральный анализы, линейная и нелинейная фильтрации, биспектральный и скользящий анализ Фурье);

– неклассические методы СЦОС (метод Прони, метод минимальной дисперсии, метод собственных чисел и ряд других методов, основанных на авторегрессионных моделях сигналов).

Следует отметить, что в настоящее время классические методы СЦОС сохраняют свою эффективность во многих предметных областях. Оценки спектров стационарных сигналов, полученные с помощью данного класса методов, являются робастными оценками. Классические методы СЦОС наиболее эффективны и с вычислительной точки зрения благодаря существованию быстрых алгоритмов преобразования Фурье [1].

Практика применения классических методов СЦОС выявила и их недостатки, которые, как показал анализ, вытекают непосредственно из свойств базиса ДПФ и проявляются в виде нежелательных эффектов (эффекта частотола, гребешкового эффекта, эффектов наложения и утечки).

В неклассических методах СЦОС выбирается некоторая модель сигнала (в виде авторегрессионного (АР) процесса, процесса скользящего среднего (СС) или авторегрессионного скользящего среднего (АРСС) и т. п.). В процессе обработки определяется набор параметров выбранной исходя из априорных сведений модели сигнала.

Необходимо отметить, что неклассические методы СЦОС разрабатывались в качестве альтернативы классическим СЦОС с целью устранения недостатков последних. Однако практика использования разработанных неклассических методов СЦОС, показала, что вышеобозначенная проблема классических методов СЦОС была решена лишь отчасти. Это объясняется тем, что методы данного класса субъективны, требуют больших допущений, чем классические, а получаемые спектральные оценки робастны только для ограниченного класса стационарных сигналов.

Особую роль в ЦОС, в том числе и в СЦОС, играет дискретный вейвлетный анализ. Вейвлетный анализ – дополнительный инструмент решения некоторых задач ЦОС и СЦОС. В данном виде довольно сложного анализа сигналов решающую роль играет интуиция и опыт исследователя. Более того, применение вейвлетного анализа в СЦОС в целом не является эффективным инструментом, поскольку смысл этого вида анализа заключается скорее в изучении нерегулярностей, чем в их исключении. Вейвлетный анализ также не следует рассматривать и как альтернативу, тем более как замену классическим методам СЦОС. Дело в том, что результаты, полученные в рамках традиционных направлений обработки информации (классические методы СЦОС полигармонических и стационарных дискретных сигналов, широко распространенных

как в естественных, так и в технических системах), не только значительны, но и проверены временем.

При рассмотрении теоретических вопросов эволюции КДСА будем придерживаться общепринятого подхода<sup>8</sup>.

На практике с целью улучшения характеристик КДСА широкое распространение получили три метода модификации исходного дискретного сигнала  $x(n)$ :

- метод дополнения дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов  $N \cdot (r-1)$  нулевыми отсчетами ( $r = \overline{1, 2, \dots}$ ) во временной области (МДНВ) [1, 8]. При МДНВ дискретный сигнал  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , представляется в виде вектора  $M = N \cdot r$ -мерного линейного пространства:

$$X_M = \left[ x(0), x(1), \dots, x(N-1), \underbrace{0, \dots, 0}_{N(r-1)} \right]^T.$$

В результате выполнения прямого ДПФ вектора  $X_M$  получают значения дискретно-временного преобразования Фурье (ДВПФ)<sup>9</sup> дискретного сигнала  $x(n)$  в  $M$  точках, равномерно распределенных на единичной окружности;

- метод трансформации спектра  $S_N$  дискретного сигнала  $x(n)$ . В результате выполнения данной операции получают значения отсчетов дискретно-временного преобразования Фурье (ДВПФ), сдвинутые по частоте относительно отсчетов ДПФ [8] на величину  $\vartheta$ . Операция осуществляется стандартным методом – умножением исходного дискретного сигнала  $x(n)$  на дискретную экспоненциальную функцию

$$\exp\left(j \frac{2\pi}{N} \vartheta \cdot n\right);$$

<sup>8</sup> В теории КДСА общепринято считать, что квантование отсчетов сигнала по уровню отсутствует. И только в последующем проводится рассмотрение различных эффектов, возникающих при переходе от дискретной к цифровой форме представления сигналов.

<sup>9</sup> Дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ) дискретного сигнала  $x(n)$  является  $z$ -преобразованием  $x(n)$  на единичной окружности:

$$S(z) \Big|_{z=\exp(j2\pi f)} = S(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi \cdot n \cdot f).$$

• метод взвешивания дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов временным окном  $\omega(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ . В этом методе дискретный сигнал  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , представляется в виде взвешенного вектора  $X_{N,\omega}$   $N$ -мерного линейного пространства:

$$X_{N,\omega} = [x(n)\omega(n), \dots, x(N-1)\omega(N-1)]^T.$$

Важную роль в обобщении дискретного преобразования Фурье, являющегося основой классического дискретного спектрального анализа, сыграли работы [1, 24–31], в которых:

- выявлены научные и технические проблемы современной цифровой спектральной обработки сигналов методами и алгоритмами на основе дискретного преобразования Фурье;
- дано развитие теории, разработаны методы и алгоритмы цифровой спектральной обработки в параметрических дискретных базисах Фурье.

**Цель настоящей работы** – обобщение прямого дискретного преобразования Фурье как основы классического дискретного спектрального анализа, а также оценки роли и места существующих методов улучшения характеристик классического дискретного спектрального анализа путем модификации исходного дискретного сигнала.

Прямое дискретное преобразование Фурье в матричной форме описывается следующими соотношениями [1, 2–5]:

$$\text{ДПФ} \Rightarrow S_N = \frac{1}{N} F_N X_N, \quad (1)$$

где  $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$  – представление дискретного сигнала  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в виде вектора  $N$ -мерного линейного пространства;  $T$  – знак транспонирования;  $S_N = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$  – вектор коэффициентов разложения  $X_N$  по системе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ):  $\text{def}(p, l) = \exp(-j \frac{2\pi}{N} pl) = W_N^{pl}$ , которая задается матрицей  $F_N$ :

$$F_N = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^1 & \dots & W_N^{(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot \quad (2)$$

Отметим, что:

- ДПФ является эволюцией представления о ряде Фурье или об интеграле Фурье [8];
- бины ДПФ дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов равны значениям ДВПФ  $x(n)$  в  $N$  точках, равномерно распределенных на единичной окружности [1, 2];
- система ДЭФ, заданная на интервале  $N$ , является ортогональной и полной базисной системой. Система ДЭФ обладает фундаментальными свойствами инвариантности к циклическому сдвигу и мультипликативности по обеим независимым переменным  $p, l = 0, N-1$ . В связи с мультипликативностью системы ДЭФ возможно построение быстрых алгоритмов вычисления ДПФ – алгоритмов БПФ с прореживанием по времени и по частоте.

В работах [1, 23–31] предложено обобщение ДПФ в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П), которое, по сути, является эволюцией ДПФ.

ДПФ-П в матричной форме описывается следующим соотношением:

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; 0 \leq \theta < 1, \quad (3)$$

где  $S_{N,\theta} = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$  – вектор коэффициентов разложения  $X_N$  по системе параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П):

$$\text{def}_p(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k+\theta)n\right].$$

Система ДЭФ-П задается матрицей:



Благодаря этому свойству системы ДЭФ-П возможно построение быстрых алгоритмов вычисления ДПФ-П – алгоритмов БПФ-П с прореживанием по времени.

5. Среднее значение ДЭФ-П по переменной  $k$  равно нулю при  $n \neq 0$ :

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{N-1} def_p(k, n, \theta) = \\ & = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} \theta n\right) \frac{1 - \exp(-j2\pi n)}{1 - \exp(-j \frac{2\pi}{N} n)}. \end{aligned}$$

6. Среднее значение ДЭФ-П по переменной  $n$  не равно нулю:

$$\sum_{n=0}^{N-1} def_p(k, n, \theta) = \frac{1 - \exp(-j2\pi n(k + \theta))}{1 - \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)\right)}.$$

7. Система ДЭФ-П ортогональна по обоим переменным:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{(k+\theta)n} \left[ W_N^{(l+\theta)n} \right]^* = \\ & = \frac{1 - W_N^{-(k-l)N}}{1 - W_N^{-(k-l)}} = \begin{cases} N, & k = l, \\ 0, & k \neq l, \end{cases} \\ & \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{(k+\theta)n} \left[ W_N^{(k+\theta)m} \right]^* = \\ & = W_N^{-\theta(m-n)} \frac{1 - W_N^{-(m-n)N}}{1 - W_N^{-(m-n)}} = \begin{cases} N, & m = n, \\ 0, & m \neq n. \end{cases} \end{aligned}$$

8. Система ДЭФ-П является полной системой, т. к. число линейно независимых функций равно размерности множества дискретных сигналов.

Базис ДЭФ-П является обобщением базиса ДЭФ и тождественен ему при значении параметра  $\theta = 0$ . Матрица  $F_{N,0}$  (4) – не симметрическая, в отличие от матрицы  $F_N$  (2), но является, так же как и матрица  $F_N$ , унитарной.

Подчеркнем, что при каждом значении параметра  $\theta$  из интервала  $[0,1)$  базис ДПФ-П свой. Другими словами, в отличие от базиса ДПФ (2), который единственен, базис ДПФ-П (5) принимает конкретный вид только после определения параметра  $\theta$ .

### **Взаимосвязь методов модификации исходного дискретного сигнала с параметрическим дискретным преобразованием Фурье**

Метод дополнения дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов  $N \cdot (r-1)$  нулевыми отсчетами ( $r = \overline{1, 2, \dots}$ ) во временной области (МДНВ) позволяет находить значения ДПФ-П только при значениях параметра  $\theta = 0, 1/r, \dots, (r-1)/r$ . Для использования алгоритмов БПФ по основанию 2 значение числа  $r$  и  $N$  должно быть равно двум в целой степени. МДНВ имеет существенные недостатки, проявляющиеся при его реализации процессорными средствами:

- необходимость существенного расширения оперативной памяти для хранения нулевых значений сигнала;
- проведение непроизводительных операций с нулевыми значениями сигнала;
- фиксированность шага дискретизации по частоте.

### **Заключение**

В результате выполненной работы исследованы вопросы обобщения прямого дискретного преобразования Фурье как основы классического дискретного спектрального анализа сигналов, предложен метод устранения недостатков, присущих методу дополнения дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов  $N \cdot (r-1)$  нулевыми отсчетами ( $r = \overline{1, 2, \dots}$ ) во временной области:

- необходимость существенного расширения оперативной памяти для хранения нулевых значений сигнала;
- проведение непроизводительных операций с нулевыми значениями сигнала;
- фиксированность шага дискретизации по частоте.

### **Список литературы**

1. Пономарева, О. В. Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье : дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. – Ижевск, 2016. – 357 с.



2. *Лайонс, Р.* Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд. – М. : Бинوم-Пресс, 2006. – 656 с.
3. *Crochiere, R. E.* Multirate digital signal processing / R. E. Crochiere, L. R. Rabiner // Prentice-Hall signal processing series / A. V. Oppenheim (ed.). – Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice-Hall, 1983. – 424 p.
4. Tech. Note ZAN34003 “Vernier Spectral Analysis with the ZR34161 Vector Signal Processor”. – Santa Clara, CA, USA : Zoran Corp., 1989.
5. *Gumas, C.* Window-presum FFT achieves high-dynamic range, resolution // Personal Engineering and Instrumentation News. – July 1997. – Pp. 58–64.
6. *Алдошина, И. А.* Музыкальная акустика: учебник / И. А. Алдошина, Р. Приттс. – СПб. : Композитор – Санкт-Петербург, 2006. – 720 с.
7. *Кузнецов, Л. А.* Акустика музыкальных инструментов : справочник. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 368 с.
8. *Трахтман, А. М.* Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М. : Сов. радио, 1975. – 208 с.
9. *Яглом, А. М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 282 с.
10. Application of the bispectrum for detection of small nonlinearities excited / C. R. P. Courtney, S. A. Neild, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater // Journal of Sound and Vibration. – 2010. – Vol. 329, no. 20. – Pp. 4279–4293.
11. *Akçay, H.* Frequency domain subspace-based identification of discrete-time singular power spectra // Signal Processing. – 2012. – Vol. 92, no. 9. – Pp. 2075–2081.
12. *Beck, R.* Characterisation of finite-precision resonators used in recursive filter DFT implementations / R. Beck, A. G. Dempster, I. Kale // Signal Processing. – 2000. – Vol. 80, no. 1. – Pp. 161–183.
13. *Chaparro, L.* Fourier analysis of discrete-time signals and systems // Signals and systems using MATLAB. – 2<sup>nd</sup> ed. – Academic Press, 2014. – Pp. 683–768.
14. *Chu, C.-P.* A new algorithm for tone detection / C.-P. Chu, L.-T. Shen, S.-H. Hwang // AASRI Procedia. – 2014. – Vol. 8. – Pp. 118–122.
15. *Onchis, D. M.* Generalized Goertzel algorithm for computing the natural frequencies of cantilever beams / D. M. Onchis, P. Rajmic // Signal Processing. – 2014. – Vol. 96. – Part A. – Pp. 45–50.
16. *Fan, C.-P.* Pruning fast Fourier transform algorithm design using group-based method / C.-P. Fan, G.-A. Su // Signal Processing. – 2007. – Vol. 87, no. 11. – Pp. 2781–2798.
17. *Fam, A. T.* Efficient matched filters for DFT based codes // Signal Processing. – 2010. – Vol. 90, no. 11. – Pp. 2996–2998.
18. *Fraile, R.* Cepstral peak prominence: a comprehensive analysis / R. Fraile, J. I. Godino-Llorente // Biomedical Signal Processing and Control. – 2014. – Vol. 14. – Pp. 42–54.
19. *Gronczyński, J.* Recursive Fourier transform algorithms with integrated windowing // Signal Processing. – 2007. – Vol. 87, no. 5. – Pp. 1003–1013.
20. Application and comparison of an ANN-based feature selection method and the genetic algorithm in gearbox fault diagnosis / A. Hajnayeb, A. Ghasemloonia, S. E. Khadem, M. H. Moradi // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38, no. 8. – Pp. 10205–10209.

21. *Hoang, V. D.* Wavelet-based spectral analysis // Trends in Analytical Chemistry. – 2014. – Vol. 62. – Pp. 144–153.

22. *Chicharo, J. F.* A sliding Goertzel algorithm / J. F. Chicharo, M. T. Kilani // Signal Processing. – 1996. – Vol. 52, no. 3. – Pp. 283–297.

23. Spectrum auto-correlation analysis and its application to fault diagnosis of rolling element bearings / A. B. Ming, Z. Y. Qin, W. Zhang, F. L. Chu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 41, no. 1–2. – Pp. 141–154.

24. *Пономарева, О. В.* Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2–7.

25. *Пономарева, О. В.* Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С. 88–91.

26. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

27. *Пономарева, О. В.* Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.

28. *Пономарева, О. В.* Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом апериодического дискретного преобразования Фурье / О. В. Пономарева, В. А. Алексеев, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2 (62). – С. 106–109.

29. *Пономарева, О. В.* Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, В. А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 126–132.

30. *Пономарев, В. А.* Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 2. – С. 8–16.

31. *Пономарев, В. А.* Инвариантность текущего энергетического Фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–22.

---

*O. V. Ponomareva*, DSc in engineering, professor

*A. V. Ponomarev*, CSc in economics, engineer

*V. A. Ponomarev*, DSc in engineering, professor

*N. V. Smirnova*, CSc in engineering, engineer

E-mail: ponva@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Generalization of a Direct Discrete Fourier Transform**

*The problems of the development of direct and inverse discrete Fourier transforms as the basis of classical discrete spectral analysis of signals are investigated. The effectiveness of known methods for modifying the original discrete signal is analyzed to improve the characteristics of classical discrete spectral analysis of signals. A generalization of the discrete Fourier transform (DFT) in the form of a parametric discrete Fourier transform (DFT-P) is proposed. The basic properties of the DFT-P bases are presented. The interrelation between the methods of modifying the initial discrete signal and the parametric DFT is considered.*

**Keywords:** basis, direct discrete Fourier transform, parametric discrete Fourier transform.

УДК 621.372

*О. В. Пономарева*, д-р техн. наук, проф.  
*А. В. Пономарев*, канд. экон. наук, инженер  
*В. А. Пономарев*, д-р техн. наук, проф.  
*Н. В. Смирнова*, канд. техн. наук, инженер  
E-mail: ponva@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Обобщение обратного дискретного преобразования Фурье**

*В работе исследованы вопросы развития обратного дискретного преобразования Фурье как основы классического дискретного спектрального анализа сигналов. Дан анализ эффективности известных методов модификации исходного дискретного сигнала с целью улучшения характеристик классического дискретного спектрального анализа сигналов. Предложено обобщение обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) в виде модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье (МДПФ-П). Приведены основные свойства базисов ОДПФ и МДПФ-П. Рассмотрена взаимосвязь методов модификации исходного дискретного сигнала с модифицированным параметрическим ДПФ.*

**Ключевые слова:** базис, обратное дискретное преобразование Фурье, модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье.

### **Введение**

Одним из основных направлений применения методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) является классический дискретный спектральный анализ (КДСА) на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [1–31]. КДСА сигналов имеет широкий круг приложений во многих областях науки и техники: общей и музыкальной акустике [6–7], сейсмологии и метеорологии [8–9], виброакустической функциональной диагностике и акустической динамике машин [10–23], гидроакустике [2–5] и т. п.

В настоящее время в области спектральной цифровой обработки сигналов (СЦОС) можно выделить следующие основные направления научных и прикладных исследований [1–5]:

- классические методы спектральной ЦОС (СЦОС) (корреляционный, векторный и спектральный анализы, линейная и нелинейная фильтрации, биспектральный и скользящий анализ Фурье);

- неклассические методы СЦОС (метод Прони, метод минимальной дисперсии, метод собственных чисел и ряд других методов, основанных на авторегрессионных моделях сигналов).

Следует отметить, что в настоящее время классические методы СЦОС сохраняют свою эффективность во многих предметных областях. Оценки спектров стационарных сигналов, полученные с помощью данного класса методов, являются робастными оценками. Классические методы СЦОС наиболее эффективны и с вычислительной точки зрения благодаря существованию быстрых алгоритмов преобразования Фурье [1].

Практика применения классических методов СЦОС выявила и их недостатки, которые, как показал анализ, вытекают непосредственно из свойств базиса ДПФ и проявляются в виде нежелательных эффектов (эффекта частоты, гребешкового эффекта, эффектов наложения и утечки).

В неклассических методах СЦОС выбирается некоторая модель сигнала (в виде авторегрессионного (АР) процесса, процесса скользящего среднего (СС) или авторегрессионного скользящего среднего (АРСС) и т. п.). В процессе обработки определяется набор параметров выбранной, исходя из априорных сведений, модели сигнала.

Необходимо отметить, что неклассические методы СЦОС разрабатывались в качестве альтернативы классическим СЦОС с целью устранения недостатков последних. Однако практика использования разработанных неклассических методов СЦОС показала, что вышеобозначенная проблема классических методов СЦОС была решена лишь отчасти. Это объясняется тем, что методы данного класса субъективны, требуют больших допущений, чем классические, а получаемые спектральные оценки робастны только для ограниченного класса стационарных сигналов.

Особую роль в ЦОС, в том числе и в СЦОС, играет дискретный вейвлетный анализ. Вейвлетный анализ – дополнительный инструмент решения некоторых задач ЦОС и СЦОС. В данном виде довольно сложного анализа сигналов решающую роль играют интуиция и опыт исследователя. Более того, применение вейвлетного анализа в СЦОС в целом не является эффективным инструментом, поскольку смысл этого вида анализа заключается, скорее, в изучении нерегулярностей, чем в их исключении. Вейвлетный анализ также не следует рассматривать и как альтернативу, тем более как замену классическим методам СЦОС. Дело в том, что результаты, полученные в рамках традиционных направлений обработки информации (классические методы СЦОС полигармонических и стационарных дискретных сигналов, широко распространенных,

как в естественных, так и в технических системах), не только значительны, но и, главное, проверены временем.

При рассмотрении теоретических вопросов эволюции КДСА будем придерживаться общепринятого подхода<sup>10</sup>.

На практике с целью улучшения характеристик КДСА широкое распространение получили два метода модификации исходного дискретного сигнала  $x(n)$ :

- метод дополнения спектра дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов  $N \cdot (r-1)$  нулевыми отсчетами ( $r = \overline{1, 2, \dots}$ ) в частотной области (МДНЧ) [1, 6]. При МДНЧ дискретный спектр  $S_N$  вещественного сигнала  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , представляется в виде вектора  $M = N \cdot r$ -мерного линейного пространства:

$$S_M = [s(0), \dots, s(N/2-1), \underbrace{0, \dots, 0}_{N(r-1)}, s(N/2), \dots, s(N-1)]^T.$$

В результате выполнения ОДПФ вектора  $X_M$ , согласно соотношению (1), получают значения дискретно-частотного преобразования Фурье (ДЧПФ)<sup>11</sup> дискретного сигнала  $x(n)$  в  $M$  точках, равномерно распределенных на временной оси;

- метод взвешивания дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов временным окном  $\omega(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ . В этом методе дискретный сигнал  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , представляется в виде взвешенного вектора  $X_{N,\omega}$   $N$ -мерного линейного пространства:

$$X_{N,\omega} = [x(n)\omega(n), \dots, x(N-1)\omega(N-1)]^T.$$

Важную роль в обобщении обратного дискретного преобразования Фурье, являющегося основой классического дискретного спектрального анализа, сыграли работы [1, 24–31].

<sup>10</sup> В теории КДСА общепринято считать, что квантование отсчетов сигнала по уровню отсутствует. И только в последующем проводится рассмотрение различных эффектов, возникающих при переходе от дискретной к цифровой форме представления сигналов.

<sup>11</sup> Дискретно-частотное преобразование Фурье (ДЧПФ) является обратным  $z$ -преобразованием  $S_N(k)$ :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_N(k) \cdot \exp(+j2\pi \cdot k \cdot t).$$

**Цель настоящей работы** – исследование вопросов обобщения обратного дискретного преобразования Фурье как основы классического дискретного спектрального анализа, а также оценка роли и места существующих методов улучшения характеристик путем модификации исходного дискретного сигнала.

Обратное дискретное преобразование Фурье в матричной форме описывается следующими соотношениями [1]:

$$\text{ОДПФ} \Rightarrow X_N = F_N^* S_N, \quad (1)$$

где  $*$  – знак комплексного сопряжения;  $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$  – представление дискретного сигнала  $x(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$ , в виде вектора  $N$ -мерного линейного пространства;  $T$  – знак транспонирования;  $S_N = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$  – вектор коэффициентов разложения  $X_N$  по системе дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ):  $\text{def}(p, l) = \exp(-j \frac{2\pi}{N} pl) = W_N^{pl}$ , которая задается матрицей  $F_N$ :

$$F_N = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ \dots \\ (N-1) \end{matrix} & \left[ \begin{matrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^1 & \dots & W_N^{(N-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{matrix} \right] \end{matrix} \cdot \quad (2)$$

В работах [1, 23–31] предложено обобщение обратного ДПФ (ОДПФ) (1), дополненного нулевыми отсчетами в частотной области в виде модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье (МДПФ-П), которое, по сути, является обобщением ОДПФ.

МДПФ-П в матричной форме описывается следующим соотношением [1]:

$$X_{N, \xi} = F_{N, \xi} S_N^C, \quad 0 \leq \xi < 1, \quad (3)$$

где вектор  $N$ -мерного линейного пространства  $S_N^C$  является результатом умножения второй половины вектора  $S_N$  (1) на множитель:

$$C = W_N^{-(M-N)\cdot\xi};$$

$X_{N,\xi}$  – вектор коэффициентов разложения  $S_N^C$  по системе модифицированных дискретных экспоненциальных функций (МДЭФ-П):

$$def_{pM}(k, n, \xi) = W_N^{-k(n+\xi)} = \exp \left[ +j \frac{2\pi}{N} k(n+\xi) \right],$$

$$k, n = \overline{0, (N-1)}, 0 \leq \xi < 1,$$

которая задается матрицей  $F_N$ :

$$F_{N,\xi} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & N-1 \end{matrix} & \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ N-1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^{-\xi} & \dots & W_N^{-\xi(N-1)} \\ 1 & W_N^{-(1+\xi)} & \dots & W_N^{-(1+\xi)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & W_N^{-(N-1+\xi)} & \dots & W_N^{-(N-1+\xi)(N-1)} \end{bmatrix} & \begin{matrix} k \\ \\ \\ \\ \end{matrix} \end{matrix} \quad (4)$$

**Основные свойства МДЭФ-П**

1. МДЭФ-П, как и ДЭФ-П, не являются функциями двух равноправных переменных  $k$  и  $n$ . Следовательно, матрица МДЭФ-П  $F_N$  асимметрична.

2. МДЭФ-П являются периодическими по переменной  $n$  и параметрически периодическими по переменной  $k$  с периодом  $N$ :

$$def_{pM}(k, (n \pm pN), \xi) = def_{pM}(k, n, \xi),$$

$$def_{pM}((k \pm pN), n, \xi) = def_{pM}(k, n, \xi) W_N^{\pm \xi \cdot N \cdot p};$$

3. Система МДЭФ-П немультимпликативна по переменной  $n$ :

$$def_{pM}(k, n, \xi) def_{pM}(k, m, \xi) \neq$$

$$\neq def_{pM}(k, (n+m), \xi), n, m = \overline{0, N-1}, n \neq m;$$

и мультипликативна по переменной  $k$ :



$$\begin{aligned} & def_{pM}(k, n, \xi) def_{pM}(l, n, \xi) = \\ & = def_{pM}((k+l), n, \xi), \quad k, l = \overline{0, N-1}, \quad k \neq l. \end{aligned}$$

4. Среднее значение МДЭФ-П по переменной  $n$  равно нулю при  $k \neq 0$ :

$$\begin{aligned} & \sum_{n=0}^{N-1} def_{pM}(k, n, \xi) = \\ & = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} \xi k\right) \frac{1 - \exp(-j2\pi k)}{1 - \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} k\right)}, \end{aligned}$$

а по переменной  $k$  не равно нулю:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{N-1} def_{pM}(k, n, \xi) = \\ & = \frac{1 - \exp(-j2\pi k(n + \xi))}{1 - \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} (n + \xi)\right)}. \end{aligned}$$

5. Система МДЭФ-П ортогональна по обем переменным:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{-(n+\xi)k} \left[ W_N^{-(m+\xi)k} \right]^* = \\ & = \frac{1 - W_N^{-(n-m)N}}{1 - W_N^{-(n-m)}} = \begin{cases} N, & n = m, \\ 0, & n \neq m, \end{cases} \\ & \sum_{n=0}^{N-1} W_N^{-(n+\xi)k} \left[ W_N^{-(n+\xi)l} \right]^* = \\ & = \frac{1 - W_N^{-(l-k)N}}{1 - W_N^{-(l-k)}} = \begin{cases} N, & l = k, \\ 0, & l \neq k. \end{cases} \end{aligned}$$

6. Система МДЭФ-П является полной системой, т. к. число линейно независимых функций равно размерности множества дискретных сигналов.

### **Взаимосвязь методов модификации исходного дискретного сигнала с ДПФ-П и МДПФ-П**

Метод дополнения спектра дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов нулевыми отсчетами в частотной области (МДНЧ) позволяет находить значения МДПФ-П только при значениях параметра  $\xi = 0, 1/r, \dots, (r-1)/r$ .

МДНЧ, аналогично МДНВ, имеет следующие существенные недостатки, которые проявляются при его реализации процессорными измерительными средствами:

- необходимость существенного расширения оперативной памяти ПРС для хранения нулевых значений спектра;
- проведение непроизводительных вычислений с нулевыми значениями спектра;
- фиксированность шага дискретизации по времени.

Эффекты применения метода взвешивания дискретного сигнала  $x(n)$  в  $N$  отсчетов временным окном  $\omega(n)$ ,  $n = \overline{0, N-1}$  при ДПФ и ДПФ-П аналогичны.

### **Заключение**

В результате выполненной работы:

- дано обобщение обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) в виде модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье, которое существенно дополнило аппарат ОДПФ;
- рассмотрены основные свойства базиса МДПФ-П – систем модифицированных параметрических дискретных ДЭФ;
- исследована взаимосвязь методов модификации исходного дискретного сигнала и МДПФ-П сигналов; приведены преимущества разработанного преобразования МДПФ-П перед существующими методами.

### **Список литературы**

1. Пономарева, О. В. Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. – Ижевск, 2016. – 357 с.

2. *Лайонс, Р.* Цифровая обработка сигналов. – 2-е изд. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с.
3. *Crochiere, R. E.* Multirate digital signal processing / R. E. Crochiere, L. R. Rabiner // Prentice-Hall signal processing series / A. V. Oppenheim (ed.). – Englewood Cliffs, NJ, USA : Prentice-Hall, 1983. – 424 p.
4. Tech. Note ZAN34003 “Vernier Spectral Analysis with the ZR34161 Vector Signal Processor”. – Santa Clara, CA, USA : Zoran Corp., 1989.
5. *Gumas, C.* Window-presum FFT achieves high-dynamic range, resolution // Personal Engineering and Instrumentation News. – July 1997. – Pp. 58–64.
6. *Алдошина, И. А.* Музыкальная акустика: учебник / И. А. Алдошина, Р. Пригтс. – СПб. : Композитор – Санкт-Петербург, 2006. – 720 с.
7. *Кузнецов, Л. А.* Акустика музыкальных инструментов : справочник. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 368 с.
8. *Трахтман, А. М.* Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М. : Сов. радио, 1975. – 208 с.
9. *Яглом, А. М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 282 с.
10. Application of the bispectrum for detection of small nonlinearities excited / C. R. P. Courtney, S. A. Neild, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater // Journal of Sound and Vibration. – 2010. – Vol. 329, no. 20. – Pp. 4279–4293.
11. *Akçay, H.* Frequency domain subspace-based identification of discrete-time singular power spectra // Signal Processing. – 2012. – Vol. 92, no. 9. – Pp. 2075–2081.
12. *Beck, R.* Characterisation of finite-precision resonators used in recursive filter DFT implementations / R. Beck, A. G. Dempster, I. Kale // Signal Processing. – 2000. – Vol. 80, no. 1. – Pp. 161–183.
13. *Chaparro, L.* Fourier analysis of discrete-time signals and systems // Signals and systems using MATLAB. – 2<sup>nd</sup> ed. – Academic Press, 2014. – Pp. 683–768.
14. *Chu, C.-P.* A new algorithm for tone detection / C.-P. Chu, L.-T. Shen, S.-H. Hwang // AASRI Procedia. – 2014. – Vol. 8. – Pp. 118–122.
15. *Onchis, D. M.* Generalized Goertzel algorithm for computing the natural frequencies of cantilever beams / D. M. Onchis, P. Rajmic // Signal Processing. – 2014. – Vol. 96. – Part A. – Pp. 45–50.
16. *Fan, C.-P.* Pruning fast Fourier transform algorithm design using group-based method / C.-P. Fan, G.-A. Su // Signal Processing. – 2007. – Vol. 87, no. 11. – Pp. 2781–2798.
17. *Fam, A. T.* Efficient matched filters for DFT based codes // Signal Processing. – 2010. – Vol. 90, no. 11. – Pp. 2996–2998.
18. *Fraile, R.* Cepstral peak prominence: a comprehensive analysis / R. Fraile, J. I. Godino-Llorente // Biomedical Signal Processing and Control. – 2014. – Vol. 14. – Pp. 42–54.
19. *Gronczyński, J.* Recursive Fourier transform algorithms with integrated windowing // Signal Processing. – 2007. – Vol. 87, no. 5. – Pp. 1003–1013.
20. Application and comparison of an ANN-based feature selection method and the genetic algorithm in gearbox fault diagnosis / A. Hajnayeb, A. Ghasemlooia, S. E. Khadem, M. H. Moradi // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38, no. 8. – Pp. 10205–10209.

21. *Hoang, V. D.* Wavelet-based spectral analysis // Trends in Analytical Chemistry. – 2014. – Vol. 62. – Pp. 144–153.

22. *Chicharo, J. F.* A sliding Goertzel algorithm / J. F. Chicharo, M. T. Kilani // Signal Processing. – 1996. – Vol. 52, no. 3. – Pp. 283–297.

23. Spectrum auto-correlation analysis and its application to fault diagnosis of rolling element bearings / A. B. Ming, Z. Y. Qin, W. Zhang, F. L. Chu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 41, no. 1–2. – Pp. 141–154.

24. *Пономарева, О. В.* Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2–7.

25. *Пономарева, О. В.* Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С. 88–91.

26. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, Н. В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

27. *Пономарева, О. В.* Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7–14.

28. *Пономарева, О. В.* Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом аперриодического дискретного преобразования Фурье / О. В. Пономарева, В. А. Алексеев, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2014. – № 2 (62). – С. 106–109.

29. *Пономарева, О. В.* Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев, В. А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 126–132.

30. *Пономарев, В. А.* Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 2. – С. 8–16.

31. *Пономарев, В. А.* Инвариантность текущего энергетического Фурье-спектра действительных дискретных сигналов на конечных интервалах / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2014. – № 1. – С. 15–22.

---

*O. V. Ponomareva*, DSc in engineering, professor

*A. V. Ponomarev*, CSc in economics, engineer

*V. A. Ponomarev*, DSc in engineering, professor

*N. V. Smirnova*, CSc in engineering, engineer

E-mail: ponva@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Generalization of the Inverse Discrete Fourier Transform**

*The problems of the development of direct and inverse discrete Fourier transforms as the basis of classical discrete spectral analysis of signals are investigated. The effectiveness of known methods for modifying the original discrete signal is analyzed to improve the characteristics of classical discrete spectral analysis of signals. A generalization of the inverse discrete Fourier transform of the IDFT is proposed in the form of a modified parametric discrete Fourier transform (MDPP-P). The basic properties of MDPF-P bases are presented. The interrelation between the methods of modifying the initial discrete signal and the modified parametric DFT is considered.*

**Keywords:** basis, inverse discrete Fourier transform, modified parametric discrete Fourier transform.

УДК 53.088: 53.082.36

*А. П. Савенков*, канд. техн. наук, доц.

*В. А. Сычев*, аспирант

E-mail: savencow@yandex.ru

Тамбовский государственный технический университет

## **Определение чувствительности бесконтактного устройства для измерения вязкости к влияющим величинам по модели измерений**

*Приведено описание бесконтактного метода измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний поверхности контролируемой жидкости, возбуждаемых газовой струей переменной интенсивности, и устройства для его реализации. Показан пример определения чувствительности измерительного устройства к плотности жидкости по модели измерений, имеющей сложный вид.*

**Ключевые слова:** бесконтактный, влияющая величина, вязкость, плотность, жидкость, струя газа.

### **Введение**

Модель измерений в общем случае представляет собой уравнение связи между входными и выходными величинами измерительного процесса, где выходная величина является измеряемой (РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения). Чувствительность измерительного устройства к влияющим величинам может быть определена непосредственно по модели или функции измерений, однако если они представляют собой сложные зависимости, то это сделать затруднительно.

В настоящей работе приведен пример определения степени влияния плотности на результат измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний поверхности контролируемой жидкости, возбуждаемых аэродинамическим воздействием переменной интенсивности [1–4].

---

© А. П. Савенков, В. А. Сычев, 2018

Прикладные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0214 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0214).

### Бесконтактные измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний поверхности жидкости

Среди бесконтактных методов измерения вязкости на основе силового действия газовой струи выделяют методы на основе автоколебаний в двухфазной системе «струя газа – жидкость» [5, 6], импульсные методы [7, 8] и методы на основе вынужденных колебаний [1–4]. Определенные степени влияния плотности жидкости на результат измерения вязкости при реализации последних представляет наибольший теоретический интерес.

На рис. 1 представлена схема бесконтактного устройства для измерения вязкости. Для определения амплитуды колебаний в устройстве применен триангуляционный детектор расстояния до поверхности жидкости с дифференциальным чувствительным элементом [9].

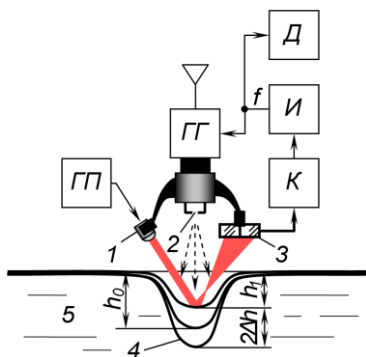


Рис. 1. Схема бесконтактного устройства для измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний поверхности жидкости

Питание лазерного диода 1 осуществляется от генератора ГП прямоугольных импульсов стабильного тока высокой частоты. Часть импульсного лазерного излучения, отраженная от поверхности углубления 4, падает на поверхность дифференциального фотодетектора 3. Из-за отражения от криволинейной поверхности углубления лазерный луч рассеивается. Высокочастотная модуляция лазерного излучения необходима для устранения влияния внешней засветки на работу устройства в связи с малой интенсивностью излучения, падающего на поверхность детектора 3. На выходе компаратора К формируется сигнал  $U_k = 1$  толь-

Генератор ГГ формирует гармонические колебания давления  $P$  перед отверстием 2 истечения газовой струи [10]. Частота  $f$  колебаний задается выходным сигналом интегратора И. Амплитуда колебаний  $\Delta P$  не зависит от частоты. Постоянная составляющая давления  $P_0$  больше амплитуды колебаний, поэтому давление  $P$  не опускается ниже минимального значения  $P_{\min}$  (рис. 2).

Колебания давления  $P$  вызывают колебания силы  $F$  действия газовой струи на поверхность жидкости 5 и колебания высоты  $h$  углубления 4. При увеличении частоты  $f$  амплитуда  $\Delta h$  колебаний высоты  $h$  углубления уменьшается вследствие действия силы вязкого трения (рис. 2).

ко в моменты времени, когда на поверхности двух частей детектора  $Z$  падают одинаковые световые потоки (рис. 2). Сигнал  $U_k = 1$  соответствует заданному значению  $h_1$  высоты углубления, которое, в свою очередь, задает амплитуду колебаний  $\Delta h = h_0 - h_1$ .

Интегратор И работает следующим образом. Если за период колебаний давления на его вход поступил хотя бы один импульс  $U_k = 1$ , интегратор увеличивает выходной сигнал – задание частоты  $f$  для генератора ГГ. В противном случае (при отсутствии импульсов на входе) интегратор И уменьшает выходной сигнал. При увеличении частоты амплитуда колебаний высоты углубления уменьшается, при уменьшении – увеличивается (рис. 2). Устройство непрерывно находится в поиске пограничного состояния (наличие или отсутствие импульсов  $U_k = 1$ ), которое соответствует заданному значению  $\Delta h$  амплитуды колебаний. Установившееся значение частоты  $f$  зависит от вязкости контролируемой жидкости. Значение вязкости определяется по частоте  $f$  и выводится на дисплей Д.

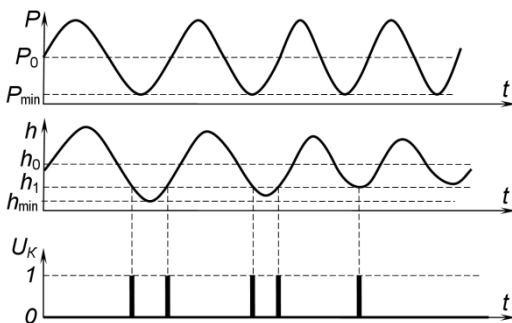


Рис. 2. Графики изменения сигналов в устройстве для измерения вязкости

Модель измерений вязкости рассматриваемым методом представлена амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) системы «струя газа – жидкость» [4]:

$$A(\omega) = \frac{\Delta h(\omega)}{\Delta P(\omega)} = \frac{\pi d^2 \mu}{2} \frac{k}{b_p \rho g R^2} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{b_p \eta}{b_p \rho g R} \omega\right)^2 + 1}}, \quad (1)$$



где  $d$  и  $\mu$  – диаметр и коэффициент расхода отверстия 2 (рис. 1);  $k$  – коэффициент формы углубления;  $b_p$  и  $b_\eta$  – коэффициенты, отвечающие за действие выталкивающей силы и силы поверхностного натяжения на углубление 4;  $\rho$  и  $\eta$  – плотность и вязкость жидкости 5;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – радиус углубления 4 на половине его высоты;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

Функцию измерений вязкости получим из АЧХ (1):

$$\eta(f) = \frac{b_p \rho g R}{2\pi f b_\eta} \sqrt{\left( \frac{\pi d^2 \mu}{2} \frac{k}{b_p \pi \rho g R^2} \frac{\Delta P}{\Delta h} \right)^2 - 1}. \quad (2)$$

### Определение степени влияния плотности контролируемой жидкости на результат измерения вязкости

Из функции (2) видно, что результат измерения вязкости  $\eta$  зависит от плотности  $\rho$  контролируемой жидкости, однако определить степень этого влияния непосредственно по этой функции затруднительно. В функцию (2) входит значение  $\Delta h = h_0 - h_1$ , в котором  $h_0$  также зависит от плотности.

Постоянную составляющую  $h_0$  высоты углубления определим из АЧХ (1) при условии  $\omega = 0$  по формуле

$$h_0 = \frac{\pi d^2 \mu}{2} \frac{k}{b_p \pi \rho g R^2} P_0. \quad (3)$$

Изменение плотности при неизменной вязкости оказывает влияние на выходной сигнал устройства – частоту  $f$ . При определении влияния плотности  $\rho$  на результат измерения вязкости  $\eta$  воспользуемся двумя значениями: исходным  $\rho_0$  и текущим  $\rho$ . Этим значениям плотности соответствуют два значения частоты  $f_0$  и  $f$ . Будем считать, что все величины в выражениях (2) и (3), в том числе и вязкость  $\eta$ , при изменении плотности остаются постоянными. Исключения составляют лишь частота  $f$  и амплитуда  $\Delta h$ , причем  $h_0$  – переменная, а  $h_1$  – постоянная.

Введём коэффициент  $A_0 = \Delta h/h_0$ , с учетом которого для плотности  $\rho_0$  из формулы (3) определим значение

$$h_1 = (1 - A_0) \frac{\pi d^2 \mu}{2} \frac{k}{b_p \pi \rho_0 g R^2} P_0, \quad (4)$$

подставляя которое в функцию (2), после преобразований получим

$$\frac{b_p g R}{2\pi\eta b_\eta} = \frac{f_0}{\rho_0 \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{A_0 P_0}\right)^2 - 1}}. \quad (5)$$

Для плотности  $\rho$  из выражений (3) и (4) определим

$$\Delta h = \left[ \frac{1}{\rho} - (1 - A_0) \frac{1}{\rho_0} \right] \frac{\pi d^2 \mu}{2} \frac{k}{b_p \pi g R^2} P_0. \quad (6)$$

Для упрощения конечного выражения примем  $P_0 = \Delta P$ . Тогда после подстановки (5) и (6) в (2) получим

$$\frac{f}{f_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \sqrt{\frac{\frac{1}{\left[1 - (1 - A_0)\rho/\rho_0\right]^2} - 1}{\frac{1}{A_0^2} - 1}}. \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, как сильно изменяется выходной сигнал устройства для измерения вязкости при изменении плотности.

На рис. 3 представлена зависимость изменения частоты  $f$  от параметра  $A_0$ . Если значение  $A_0$  выбрано равным 0,17, то для исходной плотности  $h_1 = 0,83h_0$ . При увеличении плотности контролируемой жидкости на 20 % значение  $h_0$  также составит 0,83 от исходного значения, а заданная амплитуда  $\Delta h$  колебаний высоты углубления окажется нулевой. Для достижения такой амплитуды требуется увеличение частоты колебаний до бесконечности. В этом случае влияние плотности на результат измерения вязкости наибольшее.

Левая часть графика  $f/f_0$  для  $\rho/\rho_0 = 1,2$  теоретически представляет зависимость (7). В реальных условиях при  $\rho/\rho_0 = 1,2$  и  $A_0 \leq 0,17$  устройство для измерения вязкости жидкостей, схема которого представлена на рис. 1, неработоспособно. При уменьшении плотности жидкости зависимость  $f/f_0$  от  $A_0$  разрывов не имеет, однако при малых значениях  $A_0$  влияние плотности на результат измерения вязкости значительно возрастает.

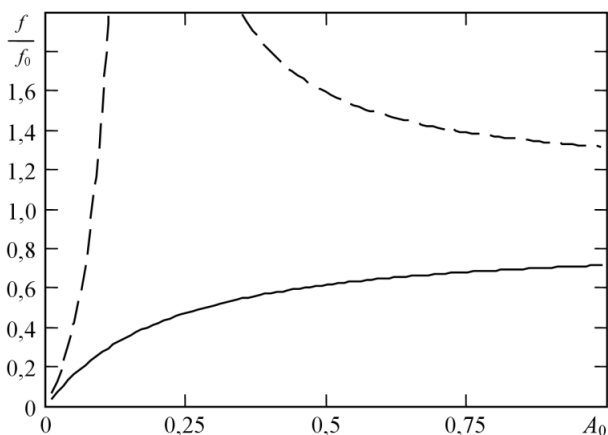


Рис. 3. Зависимость изменения выходного сигнала устройства для измерения вязкости под влиянием плотности контролируемой жидкости от параметра  $A_0$ : сплошная линия –  $\rho/\rho_0 = 0,8$ ; пунктирная –  $1,2$

Из рис. 3 видно, что для снижения влияния плотности следует выбирать большие значения параметра  $A_0$ . Несмотря на это выбор значений  $A_0$ , близких к единице, нецелесообразен. Для  $A_0 \approx 1$   $\Delta h \approx h_0$  и  $h_1 \approx 0$ . При малых отклонениях от постоянной составляющей  $h_0$  амплитуда  $\Delta h$  слабо зависит от частоты  $\omega$ . В связи с этим при  $A_0 \approx 1$  значительно возрастает погрешность измерения вязкости.

Для  $A_0 \approx 0,707$ , что соответствует первой сопрягающей частоте системы «струя газа – жидкость» [4], при изменении плотности на 20 % выходной сигнал измерительного устройства изменяется приблизительно на 40 %. Такая чувствительность к плотности в два раза превышает чувствительность к измеряемой величине – вязкости. Из непосредственного анализа функций (1) и (2) видно, что изменение вязкости приводит к пропорциональному изменению выходного сигнала устройства – частоты  $f$ .

## Выводы

Результаты теоретических исследований, представленные в настоящей работе, позволили установить, что в бесконтактном аэрогидродинамическом методе измерения вязкости по амплитуде вынужденных колебаний поверхности контролируемой жидкости плотность оказывает на результат измерения большее влияние, чем измеряемая величина. При выборе бесконтактного метода измерения вязкости следует отдать

предпочтение другим аэрогидродинамическим методам, например, импульсным, представленным в работах [7, 8].

Методика определения чувствительности измерительного устройства к влияющей величине, представленная в работе, может быть использована для анализа средств измерений, основанных на физических эффектах любой природы [11, 12].

### Список литературы

1. Пат. 2211444 РФ, G 01 N 11/16. Способ измерения вязкости жидкости по ее колебаниям / С. В. Мищенко, Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов. – № 28 ; заявл. 08.06.2001 ; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24.
2. Pat. 5005401 US, G 01 N 11/00, G 01 N 13/02. Noncontact on-line measurement of the viscosity of liquid paint / В. М. Pierce, D. В. Chang. – Appl. No. 478893 filed 12.02.1990 ; Pat. 09.04.1991.
3. Гребенникова, Н. М. Пневматический метод контроля вязкости жидкостей / Н. М. Гребенникова, М. М. Мордасов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, № 1А. – С. 81–87.
4. Мордасов, М. М. Бесконтактный неразрушающий аэрогидродинамический контроль вязкости жидкостей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 2. – С. 22–25.
5. Гализдра, В. И. Бесконтактный аэрогидродинамический метод измерения вязкости жидких веществ / В. И. Гализдра, М. М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – Т. 66, № 6. – С. 37–39.
6. Гализдра, В. И. Аэрогидродинамическое бесконтактное совокупное измерение физико-механических параметров жидкостей / В. И. Гализдра, М. М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – Т. 71, № 5. – С. 34–38.
7. Pat. 5024080 US, G 01 N 11/00. Paint viscosity monitoring system and method / P. G. Backes. – Appl. No. 503586 filed 03.04.1990 ; Pat. 18.06.1991.
8. Пат. 2170417 РФ, G 01 N 11/00. Способ определения вязкости жидкости / М. М. Мордасов, А. В. Трофимов, В. И. Гализдра, С. А. Трофимов. – № 99112020/28 ; заявл. 03.06.1999 ; опубл. 10.07.2001, Бюл. № 19.
9. Бесконтактное триангуляционное измерение расстояния до зеркальных поверхностей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, М. Э. Сафонова, В. А. Сычев // Автотриетрия. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 80–88.
10. Мордасов, М. М. Бесконтактный аэрогидродинамический метод и устройство контроля вязкости жидкостей / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов // Приборы. – 2013. – № 11. – С. 24–29.
11. Ультразвуковой расходомер для вязких жидкостей / К. М. Кириллов, А. Д. Назаров, В. Н. Мамонов, А. Ф. Серов // Измерительная техника. – 2014. – № 5. – С. 39–40.
12. Автоматизированная установка для измерения вязкости металлических расплавов / В. В. Филиппов, С. А. Упоров, В. А. Быков, К. Ю. Шуняев, Б. Р. Гельчинский // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 2. – С. 139–145.

---

A. P. Savenkov, CSc in engineering, associate professor  
V. A. Sychev, postgraduate student  
E-mail: savencow@yandex.ru  
Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

### **The Determining of the Sensitivity of a Non-Contact Device for Viscosity Measurement to Influence Quantity Using Measurement Model**

*The descriptions of a non-contact method of viscosity measurement by the amplitude of tested liquid surface forced oscillation excited by gas jet with variable intensity and a device to implement it are presented. The example of the determining the measurement device sensitivity to liquid density using the measurement model with a complex form are considered.*

**Keywords:** non-contact, influence quantity, viscosity, density, liquid, gas jet.

УДК 629.1.05

*М. В. Симонов*, аспирант  
E-mail: simonov\_marat@mail.ru

*А. А. Закиров*, аспирант  
E-mail: zexeso@gmail.com

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц.  
E-mail: shishakovkv@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях**

*Статья посвящена навигации мобильного наземного робота в сложных условиях. Предложена модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы для управления мобильным наземным роботом, позволяющая решить задачи угловой ориентации и позиционной навигации для данных условий. Для снижения накапливающейся погрешности предполагается проводить периодическое комплексирование с другими измерительными системами. Обсуждаются разные варианты такого комплексирования.*

**Ключевые слова:** БИНС, мобильный робот, навигация, комплексирование.

### **Введение**

В настоящее время роботы и робототехнические системы находят широкое применение в областях, связанных с риском для человека, например, в химической и атомной промышленности при техногенных и природных катастрофах и др. Мобильные роботы могут использоваться при решении таких задач, как инспекция и исследование труднодоступных помещений, наблюдение за различными объектами, построение карты загрязнения рабочего пространства, в поисково-спасательных операциях и т. п. [1]. Для эффективного передвижения при отсутствии внешних сигналов роботу необходимо ориентироваться в пространстве и определять свое местоположение.

Целью статьи является построение модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях.

### Постановка задачи

Объектом исследования является БИНС для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях. Присущее БИНС высокое быстродействие дает потенциальное преимущество при организации контуров активного управления и по быстродействию, и по устойчивости.

К недостаткам БИНС относится нарастающая во времени погрешность пространственных и угловых измерений, что требует на длинных интервалах времени ее комплексирования с другими навигационными или измерительными системами, относительная точность которых от времени не зависит [2].

В сложных условиях работы с присутствием высокого уровня непреднамеренных радиопомех на комплексирование со спутниковыми навигационными системами или мобильными дифференциальными наземными навигационными радиосистемами рассчитывать не приходится. В этом случае актуальным становится комплексирование с другими измерительными средствами.

В качестве таких измерительных устройств в первую очередь могут быть использованы:

- 1) одомер (измеряет длину пути через вращение колесного вала) – имеет предпочтение при направленном движении робота на значительные расстояния [3];
- 2) видеокамера (или видеокамера с лазерным дальномером) – по периодически фотографируемому изображению местности с выбранными ориентирами позволяет управлять сложной траекторией движения робота в ограниченном пространстве [4].

В качестве исследуемых методами моделирования задач для объектов с БИНС выделим следующие задачи, решаемые в условиях сильных электромагнитных помех (когда доступ к сигналам спутниковых навигационных систем не гарантирован или отсутствует):

- 1) измерение траектории поискового перемещения наземного робота на областях поверхности Земли;
- 2) определение местоположения робота при его движении по новому маршруту (формируемого из участков доступных дорог);
- 3) выполнение заданной программы перемещения наземного робота с учетом обхода встречаемых препятствий;
- 4) выбор маршрута (из участков доступных дорог) для достижения целевой точки местности;
- 5) измерение профиля подстилающей поверхности исследуемой области;
- 6) электронная коррекция кадров видеосъемки с учетом сложного движения камеры наблюдения;

7) использование БИНС в качестве датчика отклонения в контуре обратной связи, обеспечивающей прохождение наземного робота по заданной тропе с учетом обхода опасных объектов (доставка грузов через минные поля).

Для решения отмеченных задач необходимо использовать следующую взаимодополняющую систему режимов работы БИНС:

- 1) начальной выставки;
- 2) автономной работы БИНС;
- 3) комплексирования с другими измерительными средствами;
- 4) периодической калибровки БИНС в процессе ее эксплуатации.

Как уже отмечалось, в режимах комплексирования наиболее доступны следующие дополнительные средства измерений: одометр и видеокамера (с лазерным дальномером или без него).

В режимах периодической калибровки могут быть дополнительно использованы следующие средства измерений:

- сигналы спутниковых навигационных систем;
- самокалибровка на остановках – по угловым координатам;
- самокалибровка по выбираемым ориентирам на местности.

При этом возможны разные режимы (и соответствующие модели) БИНС в зависимости от решаемых задач, от величин скоростей и ускорений измерения углов и смены местоположения объекта.

В минимально необходимом составе должны быть определены и исследованы при моделировании БИНС следующие 3 режима:

- 1) режим начальной выставки – определяются требуемые для обеспечения второго режима начальные положения, углы и начальные скорости;
- 2) рабочий режим БИНС – режим измерения во времени приращений углов, координат и скоростей;
- 3) режим периодического комплексирования с другими измерительными системами – для коррекции накапливающихся во времени погрешностей БИНС.

### **Выбор систем координат**

Модель БИНС мобильного наземного робота будем строить в рамках общей теории БИНС [5]. Здесь традиционно будем использовать географическую систему координат  $OX_g Y_g Z_g$  и связанную с роботом приборную систему координат  $OXYZ$ .

Для системы координат  $OX_g Y_g Z_g$  по ГОСТ 20058-80 ось  $OX_g$  направлена на север по касательной к географическому меридиану, ось



$OZ_g$  – по касательной к параллели на восток, ось  $OY_g$  направлена в сторону, противоположную действию силы тяготения, вершина  $O$  совмещена с центром масс робота и перемещается вместе с ним.

Для системы координат  $OXYZ$  ось  $OX$  направлена по направлению движения (продольная ось робота), ось  $OZ$  – вправо вдоль поперечной оси (поперечная ось робота) и ось  $OY$  – вверх, перпендикулярно осям  $OX$  и  $OZ$  (при этом три оси образуют правую систему координат). Вдоль этих осей устанавливаются 3 акселерометра и 3 гироскопа БИНС.

Связь их единичных векторов описывается матрицей перехода:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X^0, Y^0, Z^0 \end{pmatrix}^T &= A \begin{pmatrix} X_g^0, Y_g^0, Z_g^0 \end{pmatrix}^T, \\ \begin{pmatrix} X_g^0, Y_g^0, Z_g^0 \end{pmatrix}^T &= A^T \begin{pmatrix} X^0, Y^0, Z^0 \end{pmatrix}^T, \end{aligned} \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} A_{0,0} & A_{0,1} & A_{0,2} \\ A_{1,0} & A_{1,1} & A_{1,2} \\ A_{2,0} & A_{2,1} & A_{2,2} \end{pmatrix}, \quad \begin{cases} A_{0,0} = \cos \theta \cdot \cos \psi, \\ A_{0,1} = \sin \theta, \\ A_{0,2} = -\cos \theta \cdot \cos \psi, \\ A_{1,0} = -\cos \gamma \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + \sin \gamma \cdot \sin \psi, \\ A_{1,1} = \cos \gamma \cdot \cos \theta, \\ A_{1,2} = \cos \gamma \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta + \sin \gamma \cdot \cos \psi, \\ A_{2,0} = \sin \gamma \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + \cos \gamma \cdot \sin \psi, \\ A_{2,1} = -\sin \gamma \cdot \cos \theta, \\ A_{2,2} = -\sin \gamma \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta + \cos \gamma \cdot \cos \psi, \end{cases} \quad (2)$$

где угол курса  $\psi$  отсчитывается в горизонтальной плоскости  $OX_gZ_g$  от оси  $OX_g$  против хода часовой стрелки до проекции продольной оси робота на эту плоскость; угол тангажа  $\theta$  – в вертикальной плоскости между осью  $OX$  и ее проекцией на горизонтальную плоскость; угол крена  $\gamma$  – в поперечной плоскости между осью  $OZ$  и линией пересечения указанной плоскости с плоскостью горизонта. Если правая сторона робота находится ниже горизонтальной плоскости, то крен считается положительным.

### Модель режима начальной угловой выставки

В режиме начальной выставки все необходимые начальные координаты, углы и скорости задаются в состоянии остановки робота (состоя-

ние покоя). Поэтому здесь исходное положение и начальные скорости принимаются за «нуль». Начальные углы  $(\theta_0, \gamma_0)$  выставляются по показаниям акселерометров:

$$\gamma_0 = \operatorname{arctg} \frac{g_z}{-g_y}, \quad \theta_0 = \arcsin \frac{-g_x}{g}. \quad (3)$$

Для определения угла  $\psi_0$  применяются гироскопы. Для улучшения обусловленности задачи используется следующий алгоритм:

$$\psi_0 \sim 0, \pi \Rightarrow \psi_0 = \arcsin \left\{ (\omega_y \cdot \sin \gamma_0 + \omega_z \cdot \cos \gamma_0) / U_\Gamma \right\}, \quad (4)$$

$$\psi_0 \sim \pi/2, 3\pi/2 \Rightarrow \psi_0 = \arccos \left\{ (\omega_x - U_B \sin \theta_0) / U_\Gamma \cos \theta_0 \right\}. \quad (5)$$

На основе формул (3)–(5) вычисляются углы начальной выставки.

### Модель режима угловой ориентации

В рабочем режиме БИНС решаются две взаимосвязанные задачи: угловой ориентации и позиционной навигации. Основными измерительными средствами в задаче нахождения угловой ориентации являются три гироскопических датчика угловой скорости (ДУС) или три твердотельных волновых гироскопа [6, 7]. Данными гироскопами измеряются соответствующие проекции угловой скорости  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  поворота объекта с учетом влияния собственного вращения Земли  $U$ . Эти сигналы содержат вклад переносного собственного вращения Земли и вклад относительного вращения по углам  $(\psi, \theta, \gamma)$ . В результате для нахождения временного изменения углов ориентации  $\psi(t), \theta(t), \gamma(t)$  требуется решить следующую систему дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = \omega_Y^r \sin \gamma + \omega_Z^r \cos \gamma, \\ \dot{\psi} = \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_X^r \cos \gamma - \omega_Z^r \sin \gamma), \\ \dot{\gamma} = \omega_X^r - \operatorname{tg} \vartheta (\omega_Y^r \cos \gamma - \omega_Z^r \sin \gamma), \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U_X &= U_\Gamma a_{11} + U_B a_{12}, & U_\Gamma &= U \cdot \cos \varphi, \\ \omega^r &= \omega - U, & U_Y &= U_\Gamma a_{21} + U_B a_{22}, & U_B &= U \cdot \sin \varphi, \\ U_Z &= U_\Gamma a_{31} + U_B a_{32}, & U &\approx 15,041 \text{ град/час}, \end{aligned} \quad (7)$$

где для интересующих нас небольших перемещений в ограниченной области угол широты  $\varphi$  естественно считать заданным (в общем случае нетрудно учесть его слабое изменение во времени).

В результате модель задачи угловой ориентации робота получается автономной и решается независимо от задачи позиционной навигации. Она формирует необходимую информацию об углах ориентации акселерометров в пространстве при перемещении робота. Эта информация может предварительно сглаживаться в специальном фильтре (особенно когда гироскопы будут фиксировать эксплуатационные вибрации конструкции робота при его перемещениях по пересеченной местности).

### Модель режима позиционной навигации

Задача позиционной навигации решается на основе показаний трех акселерометров, установленных вдоль осей приборной системы координат. Измеряемые акселерометрами ускорения  $n$  складываются из вектора ускорения силы тяжести с компонентами  $g = (0, -g, 0)$  и из абсолютного ускорения  $a$  точки  $O$ :

$$n = g + a, \quad a = a^e + a^c + a^r, \quad (8)$$

где переносное ускорение  $a^e = U \times U \times R$  оценивается  $U^2 R \sim 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$  ( $U = 2\pi / 24 \text{ ч} \cdot 60 \text{ мин} \cdot 7,3 \cdot 10^{-5}$ ,  $R \approx 6,36 \cdot 10^6 \text{ км} \cdot 10^3 \text{ м}$ ), что крайне мало по сравнению с  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ ; а кориолисово ускорение  $a^c = 2U \times V^r$  имеет порядок  $a^c \sim 2UV$ , что для скоростей  $20 \text{ м/с}$  будет оцениваться в  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ ; т. е. ими часто можно пренебрегать по сравнению с влиянием  $g$ , полагая  $a^e \approx 0$ ,  $a^c \approx 0$ .

Относительное ускорение  $a^r$  представляет собой сумму производной по времени от относительной скорости и влияния поворота по углам широты и долготы. Так как в нашей задаче углы широты и долготы практически не меняются, поэтому последним слагаемым тоже пренебрегаем. В итоге можно считать, что акселерометрами измеряется вектор:

$$n = g + \partial V^r / \partial t \Rightarrow V^r = \int (n - g) dt, \quad (9)$$

где вектор  $n$  предварительно с помощью выписанной выше матрицы направляющих косинусов  $A$  пересчитывается в географическую систему координат, в которой  $g = (0, -g, 0)$ .

Второе интегрирование по времени даст приращения по месту позиционирования, т. е. траекторию перемещения робота относительно за-

данных начальных условий (определяемых начальной выставкой или скорректированных в режиме комплексирования с другими измерительными системами).

### **Комплексирование с другими измерительными средствами**

*Комплексирование БИНС с одометром.* При использовании дополнительного одометра измеряется длина пути (длина траектории). Проецируя ее на оси географической системы координат, можно проводить комплексирование с соответствующими сигналами БИНС, полученными двойным интегрированием выделенных ускорений.

Из-за возможных пробуксовываний колес на малых участках перемещения точность одометра может быть хуже точности БИНС. Однако на длинных участках относительно равномерного перемещения, наоборот, ошибки БИНС будут накапливаться, а относительная точность одометра заметно ухудшиться не должна.

Для задач измерения сложных траекторий с частыми разворотами работа на ограниченной местности альтернативы БИНС нет.

*Комплексирование с видеокамерой.* По видеоизображению выбранных ориентиров можно: 1) оценить углы поворота робота; 2) измерить дальности до ориентиров (стереозрение или лазерный дальномер).

*Калибровки БИНС на периодически повторяемых остановках.* При остановках должна повторяться начальная выставка по углам. Дополнительный поворот робота на выбранные ориентиры позволит оценить изменение расстояния и координаты его новой позиции.

Калибровки БИНС в процессе движения робота. *Калибровка может проводиться периодически по сигналам навигационных радиосистем (спутниковых глобальных и наземных локальных), а также по изменению изображения участков местности с выбранными ориентирами.*

При этом корректировка точки начальной выставки производится простым сдвигом координат и углов. Однако для корректировки начальных скоростей задачу потребуется решать в обратном времени, т. к. она является нелинейной.

### **Заключение**

Приведенная трехрежимная модель БИНС предназначена для решения задачи угловой ориентации и позиционной навигации при управлении мобильным наземным роботом. Рассмотренные варианты комплексирования с другими измерительными системами позволяют периодически корректировать нарастающую во времени позиционную и угловую погрешности БИНС.

## Список литературы

1. Рыжова, Т. П. Система управления коллективом мобильных роботов : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05. – М., 2013. – 184 с.
2. Пат. 2634082 Российская Федерация, МПК G 01 C 21/00 (2006.01). Способ комплексирования бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Силина В. В. и др. – № 2016121919 ; заявл. 02.06.2016 ; опубл. 23.10.2017, Бюл. № 30.
3. Никитин, И. В. Задача навигации наземного объекта на основе данных БИНС и одометра : дис. ... канд. физ.- мат. наук: 01.02.01. – М., 2015. – 89 с.
4. Петров, Д. А. Разработка и исследование алгоритма обнаружения разноплановых особенностей телевизионных изображений при априорно неизвестных условиях наблюдения для визуальной навигации автономных мобильных роботов : дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. – Таганрог, 2016. – 157 с.
5. Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.
6. Шишаков, К. В. Построение модели волновой динамики резонатора твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2009. – № 2. – С. 66–75.
7. Шишаков, К. В. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 3. – С. 144–147.

M. V. Simonov, postgraduate student

E-mail: simonov\_marat@mail.ru

A. A. Zakirov, postgraduate student

E-mail: zexeso@gmail.com

K. V. Shishakov, CSc in physics and mathematics, associate professor

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russian Federation

## Model of Strapdown Inertial Navigation Systems for Controlling a Mobile Land Robot in Difficult Conditions

*The article is devoted to the navigation of a mobile land robot in difficult conditions. A model of a strapdown inertial navigation system for controlling a mobile land robot is proposed, which allows solving the problems of angular orientation and positional navigation for these conditions. To reduce the accumulating error, it is proposed to conduct periodic integration with other measuring systems. Various variants of this integration are discussed.*

**Keywords:** INS, mobile robot, navigation, integration.

УДК 531.383

*Р. Ф. Талибуллин*, аспирант

*С. Б. Назаров*, соискатель

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени

М. Т. Калашникова

## **Режимы управления волновыми процессами в твердотельном волновом гироскопе с двухканальной системой возбуждения резонансных колебаний**

*Рассматриваются твердотельные волновые гироскопы с кварцевым полусферическим резонатором. Анализируются основные режимы управления волновыми процессами в реализации таких гироскопов с двухканальной восьми-электродной системой возбуждения и поддержания резонансных колебаний.*

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, волновые процессы, резонансные колебания, система управления.

### **Введение**

Гироскопические приборы являются составной частью в современных системах навигации, ориентации и стабилизации. Поэтому их точность непосредственно влияет на точностные показатели этих систем в целом.

Одним из актуальных направлений развития гироскопической техники является твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) на основе полусферического резонатора [1]. Данный вид обладает высоким потенциалом по точности, надежности, устойчивости к внешним возмущениям, а также характеризуется малыми габаритами и отсутствием внутренних подвижных частей [2]. На его точностные параметры влияют точность производства механических узлов прибора, особенно резонатора, помещенного в вакуумный корпус [3, 4], а также выбранный вариант построения электронного блока управления, включая систему управления волновыми процессами внутри ТВГ [5].

В статье рассматриваются основные режимы управления волновыми процессами в твердотельном волновом гироскопе с двухканальной системой возбуждения колебаний.

### Постановка задачи

Объектом разработки и исследования является двухканальная система управления волновыми процессами в ТВГ (рис. 1). Основой ее конструктивной реализации являются восемь электродов управления, равномерно расположенных вдоль периметра полусферического кварцевого резонатора с проводящими участками напыления. При этом электроды объединяются в две четверки в направлении осей ( $C$ ,  $D$ ) измерительного устройства и создают притягивающие усилия, как показано на рис. 1,  $в$ ,  $г$ .

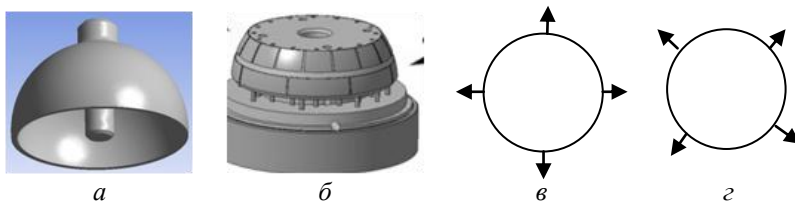


Рис. 1. Резонатор (а), управляющие электроды (б) и два канала возбуждения колебаний – по оси  $C$  (в) и по оси  $D$  (г)

Каждая из четверок электродов независима и представляет собой отдельный канал управления. Две четверки электродов, в свою очередь, реализуют двухканальную систему управления волновыми процессами резонатора твердотельного волнового гироскопа.

Наличие двух каналов управления позволяет реализовать новые режимы управления, отсутствующие у классической одноканальной системы параметрического возбуждения колебаний резонатора ТВГ с одним кольцевым электродом. Кратко рассмотрим такие режимы. В совокупности они будут формировать функциональную структуру двухканальной системы управления резонансными процессами твердотельного волнового гироскопа.

### Основные режимы в функциональной структуре двухканальной системы управления ТВГ

*Режим идентификации угловых положений осей жесткости резонатора ТВГ.* Углы осей жесткости резонатора ТВГ условно будем отсчитывать от осей измерительного устройства и обозначать через  $\theta_0$  и  $\theta_0 + \pi/4$ . На практике их знание требуется, например, для повышения точности выходного сигнала ТВГ путем дополнительной алгоритмической компенсации систематического дрейфа в нем.

Кроме этого, знание угла  $\theta_0$  позволяет построить «развязанную» систему управления модальными колебаниями резонатора. Так, в измерительных осях ( $C$ ,  $D$ ) уравнения модальных колебаний ( $p$ ,  $q$ ) могут быть записаны в следующем виде [6, 7]:

$$\begin{aligned} \ddot{p} + 2\nu_p \dot{p} + \omega_p^2 p - 2\Omega K \dot{q} &= F_p = F_C \cos 2\theta_0 + F_D \sin 2\theta_0, \\ \ddot{q} + 2\nu_q \dot{q} + \omega_q^2 q + 2\Omega K \dot{p} &= F_q = -F_C \sin 2\theta_0 + F_D \cos 2\theta_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$  – резонансные частоты;  $\nu$  – сверхмалые коэффициенты вязкости;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость вращения резонатора;  $K$  – масштабный коэффициент;  $F$  – управляющие усилия, создаваемые соответствующими четверками электродов.

При этом снимаемые измерительным устройством сигналы будут пропорциональны переменным:

$$C(t) = p(t) \cos 2\theta_0 - q(t) \sin 2\theta_0, \quad D(t) = p(t) \sin 2\theta_0 + q(t) \cos 2\theta_0, \quad (2)$$

а создаваемые в каналах управления усилия, в соответствии с (1), имеют следующую внутреннюю структуру:

$$F_C = F_p \cos 2\theta_0 - F_q \sin 2\theta_0, \quad F_D = F_p \sin 2\theta_0 + F_q \cos 2\theta_0. \quad (3)$$

Полагая здесь  $F_q = 0$  и последовательно изменяя угол  $\theta_0$  в диапазоне углов  $[0, \pi/4]$ , можно найти положение  $\theta_0$ , для которого установившиеся колебания (1) станут независимы (не будут возбуждать друг друга перекрестными связями). При этом колебания по оси  $q$  должны постепенно затухнуть ( $q(t) \approx 0$ ), что отразится в следующих зависимостях для измеряемых сигналов:

$$C(t) = p(t) \cos 2\theta_0, \quad D(t) = p(t) \sin 2\theta_0, \quad \operatorname{tg} 2\theta_0 = D(t) / C(t),$$

причем вычисляемый отсюда угол  $\theta_0$  должен совпасть с углом возбуждения в (1).

Вторая резонансная ось  $q$  будет сдвинута по углу на 45 угловых градусов. На практике такая идентификация угла  $\theta_0$  может облегчить компенсацию конструкционной разночастотности и разнородности резонатора ТВГ. Важно также подчеркнуть, что данная процедура может регулярно проводиться в рамках периодически повторяемой эксплуатационной настройки и калибровки системы управления ТВГ.

*Режим управления угловым положением осей жесткости резонатора ТВГ.* Для его рассмотрения перепишем модель (1) в осях измерительного устройства ( $C$ ,  $D$ ):



$$\begin{aligned}
\ddot{C} + 2\nu\dot{C} + \omega^2 C - 2\Omega K\dot{D} &= F_C - \\
&- \delta\nu(\dot{C} \cos 4\theta_0 + \dot{D} \sin 4\theta_0) - \delta\omega(C \cos 4\theta_0 + D \sin 4\theta_0), \\
\ddot{D} + 2\nu\dot{D} + \omega^2 D + 2\Omega K\dot{C} &= F_D - \\
&- \delta\nu(\dot{C} \sin 4\theta_0 - \dot{D} \cos 4\theta_0) - \delta\omega(C \sin 4\theta_0 - D \cos 4\theta_0).
\end{aligned} \quad (4)$$

Для того чтобы в правых частях (4), отвечающих за жесткость, вместо угла  $\theta_0$  стоял угол  $\theta_U$ , требуется создать растягивающие усилия:

$$\begin{aligned}
\delta F_{CU} &= \delta\omega(C \cos 4\theta_0 + D \sin 4\theta_0) - \delta\omega(C \cos 4\theta_U + D \sin 4\theta_U) = \\
&= C \cdot k_{\omega c} + D \cdot k_{\omega s}, \\
\delta F_{DU} &= \delta\omega(C \sin 4\theta_0 - D \cos 4\theta_0) - \delta\omega(C \sin 4\theta_U - D \cos 4\theta_U) = \\
&= C \cdot k_{\omega s} - D \cdot k_{\omega c}, \\
k_{\omega c} &= \delta\omega(\cos 4\theta_0 - \cos 4\theta_U), \quad k_{\omega s} = \delta\omega(\sin 4\theta_0 - \sin 4\theta_U).
\end{aligned} \quad (5)$$

Управление угловым положением осей жесткости резонатора ТВГ применяется при квазистатической компенсации систематического дрейфа стоячей волны. В этом случае оси жесткости располагаются равноудаленно от рабочей стоячей волны либо таким образом, когда одна из осей совмещается с угловым положением рабочей стоячей волны. В последнем случае угловая чувствительность выходного сигнала ТВГ понижается, однако не появляется ложного сигнала, вызванного слабым дрейфом стоячей волны.

*Режим малой электронной коррекции резонансной частоты на  $\Delta\omega^2$ .* Здесь управление в (4) должно быть следующим:

$$\Delta F_{C\omega} = \Delta\omega^2 \cdot C, \quad \Delta F_{D\omega} = \Delta\omega^2 \cdot D. \quad (6)$$

Оно может потребоваться, например, если резонансная частота ТВГ случайно совпала с резонансной частотой конструкции объекта.

*Режим электронной коррекции малой разночастотности  $\delta\omega$ .* В этом случае в соответствии с (4) корректирующее управление должно выбираться следующим:

$$\begin{aligned}
\delta F_{C\omega} &= \delta\omega(C \cos 4\theta_0 + D \sin 4\theta_0) = C \cdot k_{\omega c} + D \cdot k_{\omega s}, \\
\delta F_{D\omega} &= \delta\omega(C \sin 4\theta_0 - D \cos 4\theta_0) = C \cdot k_{\omega s} - D \cdot k_{\omega c},
\end{aligned} \quad (7)$$

где  $k_{\omega c} = \delta\omega \cos 4\theta_0$ ,  $k_{\omega s} = \delta\omega \sin 4\theta_0$ ,  $k_{\omega c}^2 + k_{\omega s}^2 = \delta\omega^2$ .

Здесь коэффициенты  $k_{\omega c}$ ,  $k_{\omega s}$  могут подбираться по двум параметрам на этапе настройки системы управления, например, в следующем порядке: а) задается малое  $\delta v$ ; б) из условия наименьшего дрейфа подбирается  $\theta_0$  (в диапазоне углов  $[0, \pi/4]$ ); в) делается следующий шаг по  $\delta v$  и так далее.

По мере уменьшения разночастотности модель (4) будет стремиться к своей идеальной, модально вырожденной форме. При этом чувствительность к углу  $\theta_0$  будет уменьшаться, особенно с учетом шумов изменений.

*Режим электронного увеличения добротности* – уменьшения затухания на  $2\Delta v$ . В этом случае управление в (4) должно стать следующим:

$$\Delta F_{Cv} = 2\Delta v \cdot \dot{C}, \quad \Delta F_{Dv} = 2\Delta v \cdot \dot{D}. \quad (8)$$

Такое управление «переносит» компенсацию диссипативности колебаний из контура управления колебаниями в систему электронной настройки объекта управления.

*Режим электронной компенсации конструкционной разнороботности  $\delta v$* . В этом случае с учетом (4) корректирующее управление должно стать следующим:

$$\begin{aligned} \delta F_{Cv} &= \delta v (\dot{C} \cos 4\theta_0 + \dot{D} \sin 4\theta_0) = \dot{C} \cdot k_{vc} + \dot{D} \cdot k_{vs}, \\ \delta F_{Dv} &= \delta v (\dot{C} \sin 4\theta_0 - \dot{D} \cos 4\theta_0) = \dot{C} \cdot k_{vs} - \dot{D} \cdot k_{vc}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $k_{vc} = \delta v \cos 4\theta_0$ ,  $k_{vs} = \delta v \sin 4\theta_0$ ,  $k_{vc}^2 + k_{vs}^2 = \delta v^2$ .

При этом алгоритм настройки коэффициентов  $k_{vc}$ ,  $k_{vs}$  может быть выбран аналогичным предыдущему пункту.

*Режим управляемого вращения (поворота) рабочей стоячей волны*. В этом случае корректирующее управление в (4) следует выбрать в виде

$$\Delta F_{C\Omega} = -2\Delta\Omega K \cdot \dot{D}, \quad \Delta F_{D\Omega} = 2\Delta\Omega K \cdot \dot{C}. \quad (10)$$

Тогда для неподвижного гироскопа ( $\Omega = 0$ ) будем иметь управляемую прецессию рабочей стоячей волны. Это позволит «прописать» все неравномерности работы ТВГ по углу  $\theta$  и может являться основой «самонастройки» ТВГ после длительного хранения.

Особый интерес при этом может представлять электронное выравнивание нарушений центрирования полусферического резонатора и кольца управляющих электродов. В этом случае выравнивание усилий по кольцу электродов будет производиться регулировкой коэффициентов усиления на соответствующих электродах.

### Заключение

Обобщая все перечисленные выше режимы, контуры обратных связей в рамках модели (4) должны замыкаться в соответствии со следующей структурой:

$$\begin{aligned} F_C &= k_{FC} + k_{CC1}C + k_{CD1}D + k_{CC2}\dot{C} + k_{CD2}\dot{D}, \\ F_D &= k_{FD} + k_{DC1}C + k_{DD1}D + k_{DC2}\dot{C} + k_{DD2}\dot{D}, \end{aligned} \quad (11)$$

где коэффициенты  $k$  не являются постоянными, а формируются через обратные связи соответствующих пассивных и активных контуров управления.

Самостоятельный интерес представляет нахождение коэффициентов  $k$  через алгоритмы: предварительной внешней настройки и юстировки волновых процессов ТВГ, активной коррекции в процессе самонастройки волновых процессов ТВГ, активного управления рабочей и квадратурной стоячими волнами, адаптивной настройки.

В настоящее время разработан и изготовлен отладочный вариант конструкции двухканальной восьмиэлектродной системы управления ТВГ, который продемонстрировал принципиальную работоспособность.

### Список литературы

1. Журавлев, В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние, некоторые аспекты // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. – 2011. – Т. 16. – № 2 (33). – С. 118–123.
2. Матвеев, В. А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В. А. Матвеев, В. И. Липатников, А. В. Алехин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 168 с.
3. Бонштедт, А. В. Восьмиточечная модель твердотельного волнового гироскопа / А. В. Бонштедт, С. В. Кузьмин, П. К. Мачехин // Вестник Удмуртского университета. Математика. – 2007. – № 1. – С. 135–214.
4. Оптимизация управления твердотельным волновым гироскопом / А. В. Бонштедт, С. В. Кузьмин, П. К. Мачехин, Е. Л. Тонков // Вестник Удмуртского университета. Математика. – 2005. – № 1. – С. 189–214.
5. Жбанов, Ю. К. Самонастраивающийся контур подавления квадратуры в волновом твердотельном гироскопе // Гироскопия и навигация. – 2007. – № 2 (57). – С. 37–41.
6. Шишаков, К. В. Построение модели волновой динамики резонатора твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве – 2009. – № 2. – С. 66–75.
7. Шишаков, К. В. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 3. – С. 144–147.

*P. F. Talibullin*, postgraduate student

*S. B. Nazarov*, postgraduate student

*K. V. Shishakov*, CSc in physics and mathematics, associate professor

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## **Control Modes of Wave Processes in Solid-State Wave Gyroscope with Two-Channel Control System of Resonant Oscillations**

*In this paper solid-state gyroscope with hemispherical resonator are considered. Basic control modes of wave processes in the implementation of such gyroscopes with two-channel eight-electrode control system and maintenance of resonant oscillations are analyzed. For their development, construction and electrical circuit were developed.*

**Keywords:** solid-state gyroscope, wave processes, resonant oscillations, control system.

---

УДК 004.932.2+004.051

*А. С. Шмаков*, курсант

*С. В. Новикова*, научный сотрудник

E-mail: qsvetlana@mail.ru

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

## **Исследование устойчивости корреляционного алгоритма распознавания образов на плоскости к геометрическим искажениям**

*В работе было проведено исследование распознавания объектов на изображении методом вычисления коэффициента корреляции. Рассмотрен способ сопоставления изображения с эталоном, основанный на корреляционном алгоритме, реализованном в среде инженерных вычислений Matlab.*

**Ключевые слова:** распознавание образов; среда инженерных вычислений MATLAB; коэффициент корреляции; устойчивость алгоритма; показатели эффективности.

### **Введение**

В современном мире растет популярность систем автоматизации и роботизации, главным образом используемых в областях, опасных для человека. При этом большое внимание уделяется системам технического зрения, призванным помочь человеку.

Обнаружение и локализация объекта на изображении – одна из задач, возникающих при разработке систем технического зрения. Существует множество методов распознавания образов [1]: бинаризация по порогу, выбор области гистограммы; классические методы фильтрации; вейвлет-преобразование. В основе указанных методов лежит корреляция. Классическое применение – корреляция видеопотока для нахождения сдвигов или оптических видеопотоков. Метод корреляционного распознавания заключается в вычислении двумерной корреляционной функции между изображениями входного и эталонного объектов. По характеристикам результирующего корреляционного распределения делается вывод о соответствии входного объекта эталонному.

### Описание эксперимента

Рассмотрим метод распознавания объектов на основе использования вычисления коэффициента корреляции, основанный на поэлементном вычислении разностей интенсивности изображения.

Важные недостатки корреляционных методов обнаружения проявляются в присутствии геометрических искажений текущего изображения по сравнению с эталонным изображением. В частности, наблюдается быстрое уменьшение корреляционной связи при так называемых ракурсных искажениях, например, при поворотах изображений.

Предлагается использовать корреляционный алгоритм, реализованный в среде инженерных вычислений MATLAB [1]. Коэффициент корреляции вычисляется в соответствии с выражением:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $x_m(x_1, \dots, x_m)$  – исходная матрица изображения,  $\bar{x}$  – среднее значение элементов матрицы,  $y_m(y_1, \dots, y_m)$  – матрица эталонного изображения,  $\bar{y}$  – среднее значение элементов матрицы.

Общепринятой практикой тестирования алгоритмов обработки изображений является их верификация на нескольких свободно распространяемых базах изображений, для которых есть проверяемые результаты по другим методам обработки. Примерами свободно распространяемых баз изображений являются NORB Dataset [2], MNIST Database [3] и др.

Используя алгоритм среды инженерных вычислений MATLAB, в работе проведена экспериментальная оценка устойчивости корреляционного алгоритма распознавания объекта на плоском изображении. Цель эксперимента – определить уровень искажений, при которых происходит распознавание и при которых оно становится невозможным.

Для оценки алгоритма в различных условиях в экспериментах формировались наборы данных со следующими характеристиками:

- размер сцены от  $300 \times 300$  до  $700 \times 700$ , эталоном является изображение из этой сцены размером от  $40 \times 40$  до  $200 \times 200$ ;
- изменялись углы поворота сцены от  $-20^\circ$  до  $20^\circ$  с шагом  $2^\circ$ ;
- производились уменьшения изображения по вертикали, использовались аффинные преобразования, коэффициент масштабирования изменялся от 0,2 до 0,9.

В процессе работы алгоритма происходит сканирование эталоном с равномерным шагом по полю зрения. При нахождении объекта, соответствующего эталону, на сцене обрисовывается рамка найденной области.

К распознаваемой сцене исходного изображения применены геометрические искажения, после чего осуществлен поиск эталонного объекта. На рис. 1 представлено входное изображение с выделенным на нем объектом, представляющим интерес для распознавания.



Рис. 1. Результат поиска по эталону в исходном изображении



Рис. 2. Результат поиска по эталону на трансформированном изображении (угол поворота  $12^\circ$ )

На рис. 2 представлено входное изображение, к которому применено геометрическое искажение с углом поворота  $12^\circ$  с выделенным на нем объектом, представляющим интерес для распознавания.

Обнаружение объекта рассматривается как случайный процесс. Задача эффективности технической системы состоит в определении степени соответствия системы ее назначению. Количественные характеристики этого соответствия называют показателями эффективности системы. Вероятность получения правильных решений при распознавании объектов является одним из наиболее существенных показателей эффективности системы распознавания. Вероятность правильного распознавания оценивалась путем имитационного моделирования в соответствии с методикой [4], которая состоит в следующем.

Пусть в результате обработки в соответствии, например, с некоторым алгоритмом обнаружения образов объектов на  $i$ -м изображении серии, включающей  $N$  изображений, доступны координаты точки центра обнаруженного образа  $(x_0^i, y_0^i)$  и окаймляющий прямоугольник, характеризующийся координатами верхнего левого и нижнего правого его углов  $(x_0^{i,1}, y_0^{i,1}, x_0^{i,2}, y_0^{i,2})$ . Фактически этих данных достаточно для координатометрии образа на изображении и дальнейшем переводе полученных значений в требуемую систему координат для выдачи исполнительных команд на маневрирование, например, беспилотного летательного аппарата или формирование команд в систему управления его вооружением.

Таким образом, результат работы автоматического алгоритма обнаружения по  $i$ -му изображению можно задать бинарной величиной:

$$R_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \left( \sqrt{(x_0^i - x_n^i)^2 + (y_0^i - y_n^i)^2} \leq \varepsilon \right) \vee \\ & \vee \left( S(x_0^{i,1}, y_0^{i,1}, x_0^{i,2}, y_0^{i,2}) \cap S(x_n^{i,1}, y_n^{i,1}, x_n^{i,2}, y_n^{i,2}) \geq S_\varepsilon \right), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $(x_n^i, y_n^i)$  – истинные координаты центра образа искомого объекта;  $\varepsilon$  – пороговое значение близости истинных и рассчитанных координат образа объекта;  $(x_n^{i,1}, y_n^{i,1}, x_n^{i,2}, y_n^{i,2})$  – координаты левого верхнего и правого нижнего углов истинно окаймляющего образ объекта прямоугольника;  $\vee$  – операция «логическое «или»;  $S(x_*^{i,1}, y_*^{i,1}, x_*^{i,2}, y_*^{i,2})$  – площадь прямо-



угольника с координатами левого верхнего  $(x_*^{i,1}, y_*^{i,1})$  и нижнего правого  $(x_*^{i,2}, y_*^{i,2})$  углов,  $\cap$  – операция определения доли площади пересечения истинного и рассчитанного прямоугольников;  $S_e$  – пороговое значение доли пересечения площадей.

В качестве оценки вероятности правильного обнаружения образа объекта может быть рассмотрено отношение числа изображений, на которых осуществлено правильное обнаружение ( $R_i = 1$ ), к общему числу обработанных изображений серии:

$$P_{\text{обн}} = N^{-1} \sum_{i=1}^N R_i. \quad (3)$$

В ходе испытаний получен массив, содержащий вероятности распознавания объекта. На рис. 3 по вертикали расположены значения вероятностей  $P_{\text{обн}}$ , по горизонтали – повороты сцены от  $-20^\circ$  до  $18^\circ$  с шагом  $2^\circ$ . На рис. 4 по горизонтали расположены коэффициенты масштабирования от 0,2 до 0,9.

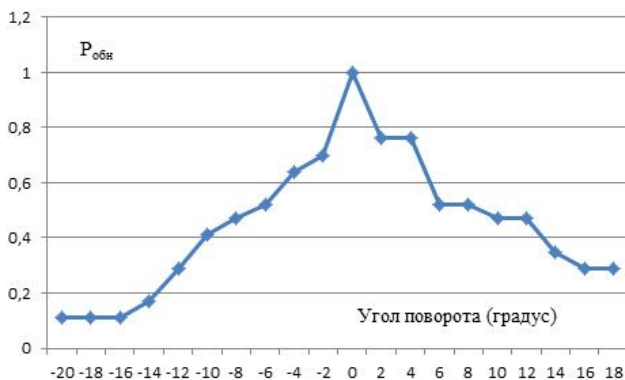


Рис. 3. График зависимости вероятности обнаружения от поворота текущего изображения сцены



Рис. 4. График зависимости вероятности обнаружения от сжатия текущего изображения сцены

Графики показывают, что при увеличении искажения изображения сцены вероятность распознавания приближается к нулю.

По результатам проведенных выше тестов видно, что алгоритм распознавания уже при угле поворота больше  $60^\circ$  имеет вероятность распознавания меньше 50 %, а изменение на  $10^\circ$  ведет к падению вероятности распознавания ниже 80 %. Также увеличение сжатия исходного изображения приводит к падению вероятности распознавания.

### Вывод

Эксперимент позволяет сделать вывод, что алгоритм корреляционного распознавания слабоустойчив к геометрическим искажениям. Эффективно система распознавания функционирует, если геометрическое искажение не превышает  $6^\circ$  при повороте и сжатие не более чем в два раза относительно исходного изображения. Таким образом, прежде чем приступать к распознаванию объекта, целесообразно произвести коррекцию исходного изображения. На данный момент известно большое количество способов коррекции изображения. Наиболее часто используется билинейная интерполяция, поскольку ее применение требует меньших вычислительных ресурсов.

### Список литературы

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
2. База изображений NORB Dataset. – URL: <http://www.cs.nyu.edu/~yiclclab/data/norb-v1.0/> (дата обращения: 25.10.2017).
3. База изображений MNIST Dataset. – URL: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html> (дата обращения: 25.10.2017).
4. Пантюхин, М. А. Методика оценки вероятностных характеристик эффективности автоматических алгоритмов обработки изображений / М. А. Пантюхин, Ю. В. Писарев, А. А. Поликарпов // Сб. науч. ст. по материалам докл. Междунар. НПК «Академические Жуковские чтения». – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – С. 200–204.

A. S. Shmakov, military student

S. V. Novikova, researcher

E-mail: qsvetlana@mail.ru

MESAFС “N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Forces Academy”,  
Voronezh, Russian Federation

### Investigation of the Stability of the Correlation Algorithm for Pattern Recognition on the Plane to the Geometric Distortions

*In the work, the recognition of objects in the image was studied by the correlation coefficient calculating method. The technique of the image comparing with the standard is considered. For analysis, the algorithm of the MATLAB engineering calculation environment is chosen.*

**Keywords:** pattern recognition, MATLAB engineering computing environment, correlation coefficient, stability of the algorithm, performance indicators.

*Электронное научное издание*

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2018.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XIV Всероссийской научно-технической конференции  
(Ижевск, 12–14 декабря 2018 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:  
[http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21\\_2018.pdf](http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2018.pdf)

Дата размещения на сайте: 11.12.2018

Технический редактор *С. В. Звягинцова*  
Корректор *И. В. Ганеева*  
Верстка *С. Е. Фокиной*

Подписано к использованию 10.12.2018. Объем 8,6 Мб.  
Уч.-изд. л. 12,88. Заказ № 354

Издательство Ижевского государственного технического университета  
имени М. Т. Калашникова  
426069, Ижевск, Студенческая, 7