

**«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2019.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА»**



Сборник материалов  
XV Всероссийской научно-технической  
конференции  
(Ижевск, 20–22 ноября 2019 года)

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

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2019.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ  
И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической  
конференции  
(Ижевск, 20–22 ноября 2019 года)



Издательство ИжГТУ  
имени М. Т. Калашникова  
Ижевск 2019

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

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

*А. Л. Кузнецов*, зам. председателя, д-р экон. 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;

*О. А. Дегтева*, 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. Николичев*, зам. директора по развитию ООО «ИИКП» (Корпорация «Аксион»);

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

*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 – 2019. Интеграция науки, образования и производства»** [Электронный ресурс]: сб. материалов XV Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 20–22 нояб. 2019 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. – 345 с. – 9,3 Мб (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 6.0 и выше.

ISBN 978-5-7526-0854-4

В сборник включены избранные, прошедшие рецензирование статьи по материалам докладов XV Всероссийской научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства», проходившей 20–22 ноября 2019 года в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова. Издание предназначено для специалистов в области приборостроения, ученых, аспирантов, магистрантов и студентов. Рассматривается широкий круг научных и технических вопросов в области приборостроения.

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-0854-4

© ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019  
© Оформление. Издательство ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019

---

## 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*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры», ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

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

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

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

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

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

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

*А. А. Айзикович*, 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;

*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;

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

## Содержание

### Секция 1. Электронные средства и системы управления

|  |    |
|--|----|
| <i>Бабошкин Г. Д.</i> Проблема достижения высокого качества управления объектом, обладающим высокой инерцией, на примере антенно-поворотного поста.....  | 8  |
| <i>Белουσое О. А., Муромцев Д. Ю., Кудряшов М. А., Колмыкова А. С., Грибков А. Н.</i> Применение алгоритмов нечеткой логики в системах управления многомерными технологическими объектами..... | 18 |
| <i>Вдовин А. Ю., Хамидуллин Р. Р., Шадрин В. В.</i> Средство имитации иницирующих воздействий на датчики опико-электронной системы, применяемой при испытаниях стрелкового оружия .....        | 23 |
| <i>Глушков В. А., Перевозчиков К. К., Трифонова Е. С.</i> Реализация программы импортозамещения на примере узла системы управления твердотельного волнового гироскопа.....                     | 30 |
| <i>Желтышев А. В., Шлыков Д. Г.</i> Повышение эффективности поиска мест повреждений на воздушных линиях в сетях с изолированной нейтралью .....  | 37 |
| <i>Караваев Ю. Л., Леконцев С. И.</i> Разработка системы стабилизации и управления движением мобильного двухколесного балансирующего робота.....   | 42 |
| <i>Мьльников К. С., Фоминых Ю. А., Струков С. А., Глушков В. А.</i> Удаленный доступ к физическому эксперименту .....  | 53 |
| <i>Штенников И. В., Мезенцев И. С., Бурмакин А. А.</i> Исследование относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь герметиков.....                         | 61 |
| <i>Штенников И. В., Новоселов И. М.</i> Пути решения проблемы обеспечения равномерности освещения горизонтальных поверхностей на разных высотах .....  | 68 |

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

|  |     |
|--|-----|
| <i>Богдан О. П., Злобин Д. В., Молин С. М., Рысев Д. С.</i> Исследование возможности обнаружения дефектов в пенополиэтилене акустическим бесконтактным методом.....    | 76  |
| <i>Богдан О. П., Ширококова А. Д., Гуляева Ю. С., Халтурина Т. А.</i> Исследование влияния глубины обзора на уровень интенсивности ультразвукового излучения .....     | 86  |
| <i>Булдакова И. В., Волкова Л. В., Трофимова Н. Л., Смольников М. В., Коротков И. В.</i> Измерение двухосных напряжений в замках буровых труб .....                    | 94  |
| <i>Волкова Л. В., Водеников С. К., Перевощикова М. А.</i> Исследование параметров вихретокового контроля электропроводности и плотности терморасширенного графита..... | 101 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Волкова Л. В., Исмаилов Р. М., Синцов М. А.</i> Оценка внутренних механических напряжений и упругих модулей в металле магистральных газопроводов .....  | 111 |
| <i>Казанцев С. В., Муравьев В. В.</i> Распространение головной волны в рельсах со стыком, выполненным электроконтактной сваркой.....   | 119 |
| <i>Муравьева О. В., Платунов А. В., Волкова Л. В., Павинев Э. В.</i> О возможности ультразвукового контроля подошвы рельса многократным зеркально-теневым методом.....   | 128 |
| <i>Мурашов С. А., Кузнецов Е. П., Мурашова Д. С., Биринцева Е. С.</i> Методика повышения точности измерения виброскорости при выполнении вибрационной эластографии по изображениям, полученным в РW-режиме ультразвукового сканера ..... | 134 |
| <i>Подкин Ю. Г.</i> Требования к построению системы экологического мониторинга вод пресных водоемов и раннего предупреждения о их загрязнении .....  | 146 |
| <i>Саитов Р. И., Абдеев Р. Г., Парфенова Е. Г.</i> Разработка СВЧ-влажгомера древесной стружки и опилок.....   | 154 |
| <i>Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Мкртчян С. С., Пряхин А. В.</i> Результаты комплексных испытаний композитной арматуры.....  | 161 |
| <i>Якимов А. В., Муравьев В. В., Тапков К. А., Андреев А. В.</i> Исследование распределения остаточных напряжений в рельсах методом акустоупругости.....   | 170 |

### Секция 3. Радиотехника, связь, информационные технологии

|  |     |
|--|-----|
| <i>Александрова М. Е.</i> Формирование сигналов в цифровых усилителях мощности с помощью перераспределения энергии в спектре импульсной последовательности .....   | 177 |
| <i>Бабошкин Г. Д.</i> Преимущества дробных автоматических систем управления объектами, обладающими высокой инерцией .....  | 185 |
| <i>Бояришинов М. А., Хатбуллин Р. А., Зыкин А. А., Черенков Ю. Н., Загидуллин Ю. Т., Симушин А. А.</i> Программно-аппаратный комплекс для имитации радиоэлектронного противодействия работе средств связи.....               | 194 |
| <i>Верба Б. П., Шишаков К. В.</i> Экспериментальное исследование влияния вариантов развертывания V-антенны на эффективность радиосвязи в ближней зоне на частотах вблизи 4,7 МГц.....  | 203 |
| <i>Гравинин В. Г., Стойчев С. В., Ушаков П. А.</i> Реализация результатов синтеза ЭФИ на основе РС-ЭРП со структурой слоев R-C-0 .....   | 214 |
| <i>Давев Ж. А., Султанов Н. З.</i> Автоматическая система одоризации природного газа, основанная на методах нечеткой логики .....  | 221 |
| <i>Закиров А. А., Казаков И. П., Шишаков К. В.</i> Статическая калибровка блока из трех ортогонально расположенных акселерометров .....  | 229 |
| <i>Кайсина И. А., Титов В. В., Васильев Д. С., Абилов А. В., Кайсин А. Е.</i> Экспериментальное исследование ретрансляции мультипоточковой передачи данных по стандарту WiFi 802.11g на частоте 2,4 ГГц в режиме Ad-Hoc .... | 236 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Калистратов А. П., Афанасьев Г. И.</i> Постановка задачи выбора оптимальной виртуальной машины для решения вычислительных задач предприятия .....  | 245 |
| <i>Статья отозвана по заявлению авторов</i> .....   | 250 |
| <i>Подсизерцев М. А., Ушаков П. А., Максимов К. О.</i> Проблемы обеспечения заданных параметров элементов с фрактальным импедансом на высоких частотах .....  | 259 |
| <i>Раев А. С., Заидулин Ю. Т., Копысов А. Н., Хворенков В. В.</i> Разработка методики и оценка характеристик SDR-модулей, входящих в состав стенда цифровой антенной решетки .....  | 266 |
| <i>Раев А. С., Касимов П. М., Зайцева А. А., Копысов А. Н.</i> Исследование и оценка характеристик сквозного тракта стенда, реализующего цифровую антенную решетку .....  | 277 |
| <i>Ситников В. В.</i> Постановка задачи проверки блоков индикации локомотивных с использованием машинного зрения .....  | 286 |
| <i>Спирidonов Ф. И., Кривов А. В., Мингазов Р. И., Шишаков К. В.</i> Автоматическое определение осей жесткости резонатора твердотельного волнового гироскопа .....  | 292 |
| <i>Стойчев С. В., Гравшин В. Г., Ушаков П. А.</i> Проверка возможности создания элемента с фрактальным импедансом на основе комплементарных RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR .....                                   | 298 |
| <i>Фукалова Н. А., Нистюк А. И., Лихачева Л. И., Рамазанова С. Н.</i> Установки для экспериментальных исследований тактильных ощущений изображения на средствах отображения информации телекоммуникационных устройств ..... | 306 |
| <br><b>Секция 4. Физико-математические методы в приборостроении</b>   |     |
| <i>Возмищева Т. Г., Рудина Ю. И.</i> Исследование модифицированной модели войны или сражения на основе модели Лотки – Вольтерра, качественный и численный анализ .....  | 314 |
| <i>Клишин С. В., Шаронов А. И.</i> Имитационная модель комплексной балансировки резонатора твердотельного волнового гироскопа .....   | 323 |
| <i>Ловчий И. Л.</i> Моделирование параметров оптических приборов регистрации геометрических и физических величин в среде графического программирования LabVIEW .....  | 328 |

## Секция 1. Электронные средства и системы управления

УДК 681.5.073

Г. Д. Бабошкин, аспирант  
E-mail: glbaboshkin@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Проблема достижения высокого качества управления объектом, обладающим высокой инерцией, на примере антенно-поворотного поста**

*В работе рассматривается проблема достижения высокого качества управления системы с объектом, имеющим высокую инерционную составляющую. В качестве примера объекта управления выбран антенно-поворотный пост массой 6,5 тонн. Произведен расчет передаточных функций по скорости и углу поворота объекта управления. Представлены результаты моделирования системы управления выбранным объектом с помощью ПИД-регулятора, подтверждена актуальность проблемы достижения одновременно низкого перерегулирования и малого времени установления переходного процесса.*

**Ключевые слова:** автоматическая система управления, ПИД-регулятор, высокоинерционный объект управления.

#### **Введение**

Системы слежения за подвижными объектами всегда отличались высокими требованиями к качеству управления, а именно низкому перерегулированию и времени установления переходного процесса.

Однако не все объекты, управляемые классическими цепями автоматических систем управления (АСУ), такими как ПИД-регулятор, позволяют достичь требуемых характеристик. Наиболее часто проблемы возникают при управлении объектами, обладающими высокой инерционной составляющей.

Примером такого объекта является антенно-поворотный пост (АПП) радиолокационного следящего устройства. Масса конструкции АПП достигает 6,5 тонн, что вызывает значительный маховый момент на вал электромотора.

Цель данной работы – рассчитать передаточную функцию АПП с электромотором и подтвердить актуальность проблемы достижения высокого качества управления объектов, обладающих высокой инерционной составляющей.

### Сведения из теории

Под высоким качеством управления, здесь и далее, будем принимать минимально допустимое время установления переходного процесса системы по реакции на появление уставки при низком перерегулировании системы (от 0 до 10 %).

Более подробно рассмотрим понятие объекта управления, обладающего высокой инерционной постоянной.

Под объектом управления будем принимать маховик поворотного механизма, приводимого в движение электромотором (ЭМ).

Передаточная функция по управляющему сигналу такого ЭМ определяется выражением [1]:

$$W(p) = \frac{K}{T_s T_j p^2 + T_j p + 1}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент передачи, определяемый как максимальная скорость вращения двигателя в [рад/с];  $T_s$  – электромагнитная составляющая ЭМ;  $T_j$  – инерционная составляющая системы [1];  $p$  – комплексная частота.

Инерционная составляющая – величина, определяемая суммарным инерционным моментом  $J$  маховика и параметрами ЭМ, определяющая время разгона от неподвижного состояния до номинальной скорости вращения, под действием постоянного избыточного момента, равного номинальному моменту двигателя [1]:

$$T_j = J \frac{n^2}{P_{\max}} \quad (2)$$

где  $n$  – максимальная скорость вращения ротора ЭМ;  $P_{\max}$  – максимальная мощность ЭМ.

Учитывая соотношение  $J = \frac{GD^2}{4}$ , где  $GD^2$  – маховый момент системы, и соотношения единиц измерения параметров ЭМ, можно преобразовать выражение (2) следующим образом:

$$T_j = \frac{GD^2 [\kappa\text{г} \cdot \text{м}^2] \cdot n^2 \left[ \frac{\text{па}\text{д}^2}{\text{с}^2} \right]}{P \max [\text{Вт}]} = 2.74 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{GD^2 [m \cdot \text{м}^2] \cdot n^2 \left[ \frac{\text{об}^2}{\text{мин}^2} \right]}{P \max [\text{МВт}]}; \quad (3)$$

Выражение (3) имеет более удобную форму для расчета параметров маховика по данным, заложенным в справочниках на ЭМ [1].

Маховый момент – величина, определяемая по формуле

$$GD^2 = m \cdot D^2$$

где  $m$  – масса маховика, а  $D$  – диаметр вращения его центра масс. В случае если центр масс маховика совпадает с осью вращения ротора ЭМ, тогда в качестве  $D$  принимается радиус вала ротора [2].

Электромагнитная составляющая объекта – величина постоянная для выбранного ЭМ и определяемая выражением:

$$T_{\text{э}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \beta \cdot \frac{U_{\text{я}}}{2\pi \cdot f_{\text{ном}} \cdot I_{\text{я}}} \cdot \frac{1}{R_{\text{я}}} = \frac{\beta}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}}, \quad (4)$$

где  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной обмотки;  $R_{\text{я}}$  – сопротивление якорной обмотки;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности (по упрощенной формуле Уманского принимается 0,6 для объектов без компенсации и 0,25 для объектов с компенсацией);  $f_{\text{ном}}$  – номинальная частота рабочего тока двигателя;  $I_{\text{я}}$  – ток якорной обмотки электродвигателя [3].

Произведение инерционной и электромагнитной составляющей в уравнении (1) называется электромеханической составляющей и определяет время разгона объекта управления из неподвижного состояния до скорости, равной 10 % от номинального значения скорости вращения ЭМ. Это время разгона определяется временем насыщения обмотки якоря и нарастанием избыточного момента двигателя, приводящего его в движение.

Из приведенных уравнений очевидно, что основное влияние на скорость нарастания кривой разгона объекта управления оказывают массогабаритные размеры маховика и его положение относительно оси ротора ЭМ.

### Расчетная часть

Рассмотрим в качестве объекта управления антенно-поворотный пост (АПП), представляющий собой маховик массой 6,5 тонн, приводимый в движение двигателем ДСМ-3,0-3000, характеристики которого указаны в таблице.

### Характеристики двигателя ДСМ-3,0-3000

| Сокращенное обозначение | Мощность $P_{\max}$ , кВт | Частота вращения $n$ , об/мин | Линейное напряжение, В | Вращающий момент, Н·м | Межфазное сопротивление $X_r$ , Ом | ЭДС, В | Диаметр вала $D$ , мм |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------|-----------------------|
| ДСМ-3,0-3000            | 3                         | 3000                          | 220                    | 9,6                   | 0,3                                | 170    | 20                    |

Передачным механизмом между валом электродвигателя и осью вращения АПП является цилиндрический редуктор. Центр масс АПП совпадает с осью его вращения. Условная схема поворотного устройства изображена на рис. 1. Электродвигатель 1 приводит в движение ведущее колесо редуктора 2 с числом зубьев  $Z1$ , равным 20. Ведомое колесо редуктора обладает числом зубьев  $Z2.1$ , равным 82, и делительным диаметром  $D_3$ , равным 41 мм. Ведомое колесо приводит во вращение зубчатое колесо  $Z2.2$ , аналогичное колесу  $Z1$ , образующее передаточное звено с колесом 3, аналогичным колесу  $Z2.1$ . Колесо 3 состыковано с платформой 4 для АПП.

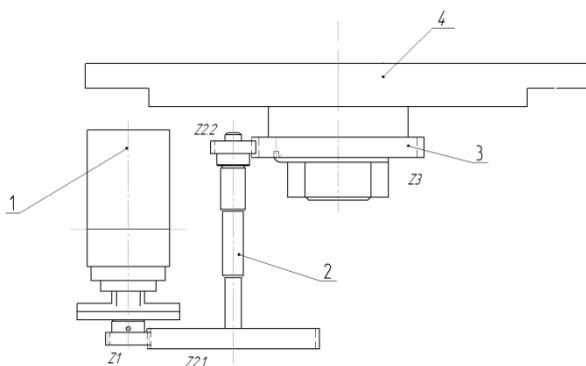


Рис. 1. Условная конструкция АПП

Рассчитаем маховый момент, прилагаемый к оси двигателя.

Маховый момент на ось двигателя  $GD_1^2$  равен маховому моменту, прилагаемому на ось вращения ведомого колеса ротора  $GD_2^2$  с учетом передаточного числа между колесами  $Z1$  и  $Z2.1$ , т. е.

$$GD_1^2 = \frac{GD_2^2}{j_{1-2}} = \frac{GD_2^2 \cdot Z1}{Z2.1}, \quad (5)$$

где  $j_{1-2}$  – передаточное число по моменту между зубчатыми колесами  $Z1$  и  $Z2.1$  [4].

Маховый момент на ось ротора  $GD_2^2$  равен маховому моменту, прила-гаемому на ось вращения колеса 3  $GD_3^2$  с учетом передаточного числа между колесами Z2.2 и 3, т. е.

$$GD_2^2 = \frac{GD_3^2}{j_{2-3}} = \frac{GD_3^2 \cdot Z2.2}{Z3}, \quad (6)$$

где  $j_{2-3}$  – передаточное число по моменту между зубчатыми колесами Z2.2 и Z3.

Подставив (6) в (5), получим:

$$GD_1^2 = \frac{GD_3^2 \cdot Z2.2 \cdot Z1}{Z3 \cdot Z2.1} = \frac{GD_3^2 \cdot Z1^2}{Z3^2} = \frac{m \cdot D_3^2 \cdot Z1^2}{Z3^2} = \frac{6.5 \cdot 0.041^2 \cdot 20^2}{82^2} = 0.00065 [m \cdot m^2]$$

Подставив полученный маховый момент в выражение (3), получим инерционную составляющую объекта управления

$$T_j = 2.74 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{GD^2 [m \cdot m^2] \cdot n^2 \left[ \frac{об^2}{мин^2} \right]}{P_{\max} [MBm]} = 2.74 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0.00065 \cdot 3000^2}{0.003} = 5.343 [с]$$

Электромагнитную составляющую АПП получим, учитывая, что дви-гатель ДСМ-3,0-3000 имеет компенсационную обмотку и рабочую частоту тока статора 400 Гц, таким образом, из выражения (4) следует:

$$T_3 = \frac{\beta}{2\pi \cdot f_{ном}} = \frac{0.25}{2\pi \cdot 400} = 9.95 \cdot 10^{-5} [с]$$

Используя полученные временные постоянные АПП, определим пе-редаточную функцию объекта управления согласно выражению (1):

$$W(p) = \frac{K}{T_3 T_j p^2 + T_j p + 1} = \frac{312}{0.0005 p^2 + 5.343 p + 1}. \quad (7)$$

На рис. 2 представлена кривая разгона АПП.

По рисунку видно, что при появлении управляющего сигнала, АПП разгоняется до максимальной скорости вращения (312 рад/с) за 20,9 секунд. Очевидно, что кривая торможения (импульсная характеристика) будет иметь время торможения, равное времени разгона.

Огромная масса маховика АПП и малый диаметр вала ротора ЭД создадут высокую инерционную постоянную, таким образом, рассматриваемый объект управления можно назвать высокоинерционным.

Тем не менее, требования к автоматическим системам управления (АСУ) подобными объектами бывают крайне высоки. Был рассмотрен

реальный случай АСУ исследуемым объектом управления со следующими требованиями к управлению: частотный коэффициент колебательно-сти (ЧКК) не более 1,1; время поворота АПП на  $180^\circ$  не более 4,5 с.

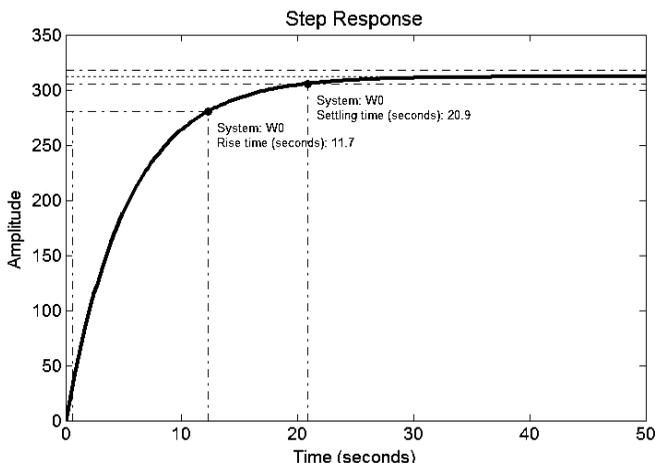


Рис. 2. Кривая разгона АПП

Чтобы создать такую систему, необходимо перейти от передаточной функции объекта управления по скорости к передаточной функции по координате, для этого сделаем следующее:

1. Так как электромеханическая составляющая на пять порядков меньше, чем инерционная составляющая, она не вносит изменений в кривую разгона объекта управления, поэтому упростим выражение (7) до следующего вида:

$$W(p) = \frac{K}{T_j p + 1} = \frac{312}{5.343 p + 1}. \quad (8)$$

2. Угловая скорость вращения маховика  $\omega$  – это первая производная угла поворота  $\varphi$  по времени, то есть:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (9)$$

В комплексном виде данное выражение будет иметь следующий вид:

$$W(p) = \Psi(p) \cdot p,$$

где  $W(p)$  – передаточная функция объекта управления по скорости, а  $\Psi(p)$  – по углу поворота.

Тогда

$$\Psi(p) = \frac{W(p)}{p} = \frac{312}{5.343 p^2 + p} \quad (10)$$

Выражение (10) – передаточная функция по углу поворота для вала ЭД. Нас же интересует угол поворота антенного поста, таким образом, передаточное число редуктора по скорости:

$$i = i_{1-2} \cdot i_{2-3} = \frac{Z1 \cdot Z2.2}{Z2.1 \cdot Z3} = 0.059$$

Учтем передаточное число редуктора в выражении (10) и получим передаточную функцию АПП по координате:

$$\Psi(p) = \frac{W(p) \cdot i}{p} = \frac{18.6}{5.343 p^2 + p} \quad (11)$$

Механическая характеристика АПП представлена на рис. 3.

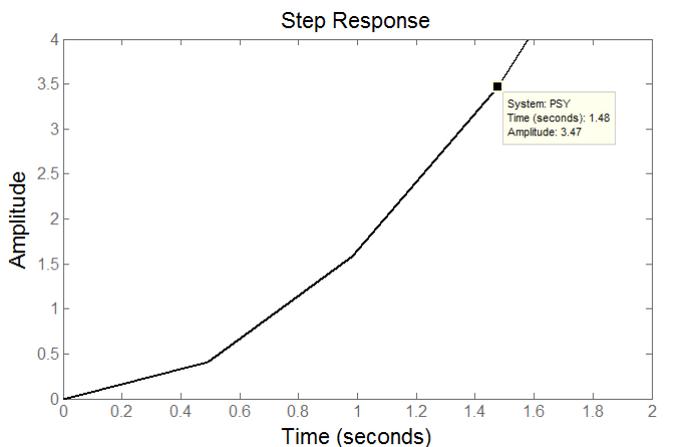


Рис. 3. Механическая характеристика АПП

Переброс АПП на  $180^\circ$  (3,14 радиан по механической характеристике на рис. 3) осуществляется менее чем за 1,4 секунды. Двигатель обеспечивает требуемую скорость вращения АПП, однако передаточная функция (11) не имеет асимптоты. Таким образом, для точного контроля координаты положения АПП необходима цепь отрицательной обратной связи.

Классическим решением в таком вопросе может являться ПИД-регулятор. Основным преимуществом ПИД-регулятора являются его динамические характеристики, позволяющие контролировать уставку в широком диапазоне частот сигнала ошибки.

Современные программные средства оптимизации позволяют получить коэффициенты управления ПИД-регулятора практически для любой системы. Воспользуемся одним из таких оптимизаторов, встроенным в программу MatLab R2012b.

В качестве исходных данных для оптимизации выберем: запас по фазе, равный  $60^\circ$ , как верхний диапазон для нормально демпфированной системы [2]; время установления переходного процесса 4,5 секунд. В таком случае необходимо будет контролировать необходимый ЧКК не более 1,1.

Получившаяся переходная характеристика системы изображена на рис. 4.

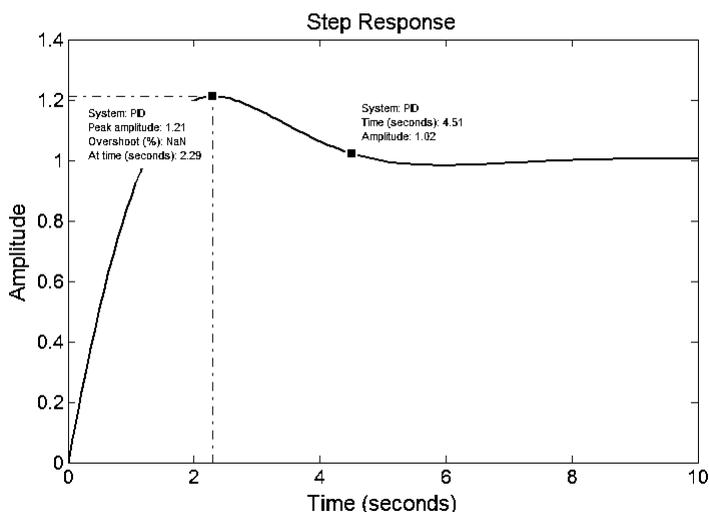


Рис. 4. Переходная характеристика АПП с классическим ПИД-регулятором

Результирующая АСУ АПП обеспечивает требуемое время установления переходного процесса при перерегулировании, равном 21 %. Такое перерегулирование определяет ЧКК системы величиной 1,21, что не соответствует требуемым условиям.

В этом и заключается основная проблема управления, описанная во введении: для объектов управления, обладающих высокой инерцией, не-

возможно обеспечить высокое качество управления с помощью классических цепей.

Как доказательство тому на рис. 5 представлена переходная функция АСУ АПП с ПИД-регулятором, обеспечивающим требуемое перерегулирование, равное 10 %. При этом время установления – 39,6 секунд.

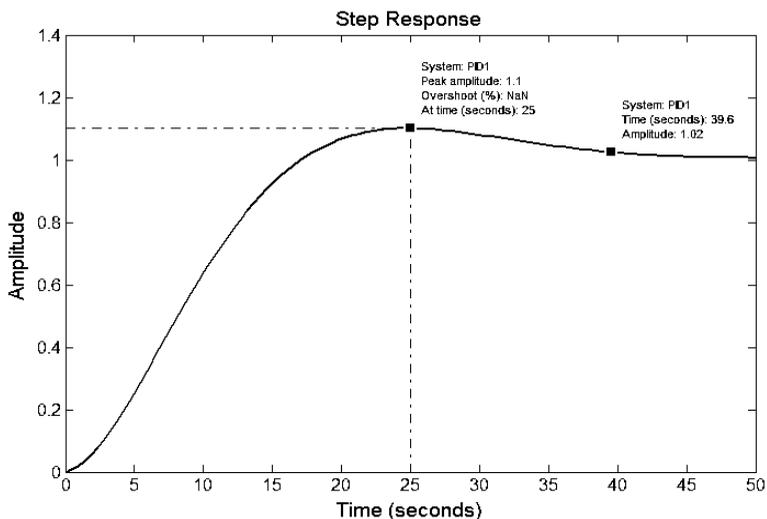


Рис. 5. Переходная характеристика АПП с классическим ПИД-регулятором (перерегулирование – 10 %)

## Вывод

Результаты проведенного моделирования и сравнения подтвердили описанную во введении проблему и обосновали актуальность исследования новых законов управления, обеспечивающих высокую точность управления подобными объектами.

Несмотря на все преимущества ПИД-регулятора, существенным его недостатком является постоянный угол наклона АЧХ в диапазонах частот интегрирования и дифференцирования. Наклоны АЧХ в этих диапазонах определяют чувствительность соответствующих звеньев, в данном случае наклон величиной 20 дБ/дек Д-звена создает излишнее воздействие на сигнал ошибки, что вызывает высокое перерегулирование.

### Список литературы

1. Шелтинг, Г. Электрические машины / Г. Шелтинг, А. Байссе. М. : Энергоатомиздат, 1991. 229 с.
2. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. СПб. : Профессия, 2003. 747 с.
3. Усынин, Ю. С. Системы управления электроприводов : учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. Челябинск : ЮУрГУ, 2004. 328 с.
4. Гутин, С. Я. Информационные технологии в эскизном проектировании и оптимизации параметров зубчатых цилиндрических редукторов / С. Я. Гутин, М. Ю. Власов. М. : Высш. шк., 2004. 110 с.

G. D. Baboshkin, postgraduate student

E-mail: glbaboshkin@rambler.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### The Problem of Achieving High Quality Control of an Object with High Inertia Using the Example of an Antenna-Rotary Post

*The paper deals with the problem of achieving a high quality control system with an high inertial object. As an example, the control object is selected as antenna turning post weighing 6.5 tons. The calculation of the transfer functions for the speed and angle of rotation of the control object is presented. The results of the simulation of the control system of the selected object using the PID-controller are presented, the urgency of the problem of simultaneously achieving low overshoot and a short transient establishment time is confirmed.*

**Keywords:** automatic control system, PID controller, high-inertia control object.

УДК 621:681.306

*О. А. Белоусов*, канд. техн. наук, доц.  
*Д. Ю. Муромцев*, д-р техн. наук, проф.  
*М. А. Кудряшов*, студент  
*А. С. Колмыкова*, аспирант  
*А. С. Грибков*, д-р техн. наук, доц.  
E-mail: jjour314@gmail.com

Тамбовский государственный технический университет

## **Применение алгоритмов нечеткой логики в системах управления многомерными технологическими объектами**

*В настоящее время широко используются технологические многомерные объекты, такие как сушильные установки, электрокамерные печи и др. Предлагается использовать в системах управления таких объектов алгоритмы нечеткой логики (нечеткий регулятор) или интеграцию такого регулятора к существующим (гибридный), что позволит синтезировать управляющие воздействия в реальном масштабе времени при разных условиях функционирования, таких как выход из строя одного или нескольких нагревательных элементов, нарушение технологического процесса вследствие изменения температурного режима (незапланированная нагрузка).*

**Ключевые слова:** нечеткая логика, многомерные объекты, система управления, гибридный регулятор.

### **Введение**

В настоящее время существует достаточно много технологических объектов, в частности это многомерные технологические объекты, к которым можно отнести различное технологическое оборудование, такое как многозонные электрокамерные печи, сушильные установки т. д.

В данной работе рассматривается применение алгоритмов нечеткой логики в системах управления технологическими объектами при различных условиях функционирования.

Основу теоретической базы исследования составили научные труды по теории нечеткой логики Л. А. Заде [2], А. Кофман [3], Р. Р. Ягера [4] и др.

Практическая актуальность работы связана с необходимостью повышения эффективности работы этого оборудования при разных условиях функционирования и оперативном управлении в реальном масштабе времени динамическими режимами технологического оборудования, в част-

ности многозонными электрокамерными печами или группой таких печей и отсутствием в ряде таких систем возможности работы при воздействии дестабилизирующих факторов.

Научная актуальность работы обусловлена тем, что существующие системы управления используют в своей основе базовые алгоритмы управления (ПИ-, ПИД-регулирования), которые в большинстве случаев генерируются SCADA-системой и не всегда удовлетворяют потребностям с точки зрения оперативного управления и реагирования на сложившиеся ситуации.

### Основной раздел

Рассмотрим в качестве объекта управления группу электрокамерных печей. К особенностям функционирования следует отнести следующее:

- группу таких печей обычно составляют объекты с разными техническими характеристиками (габариты, мощность, температурный диапазон и т. д.);

- плановые задания выдаются на всю группу ЭКП, эти задания меняются по номенклатуре и объему и при этом для каждой печи из группы возможен различный технологический регламент;

- воздействие дестабилизирующих факторов.

Указанные особенности не позволяют оперативно управлять группой печей без применения интеллектуальных алгоритмов управления, так как они не учитывают виды и варианты загрузки, т. е. в какую печь и в какой момент времени произвести загрузку сырья или догрузку, время открытия дверцы печи и т. д.

Поэтому предлагается использовать алгоритмы нечеткой логики, которые позволят учесть различные технические характеристики печей, состоящих в группе, а также оптимальным образом поддерживать траекторию управления в зависимости от технологического режима ЭКП.

Алгоритмы нечеткой логики представляют собой некоторую структуру, состоящую из блока ввода (блока fuzzy), набора продукционных правил и блока вывода (блока defuzzy). Такая представленная структура хорошо интегрируется в существующие системы управления и позволяет учитывать особенности функционирования группы печей [1, 5].

Разберем работу fuzzy-регулятора при управлении тепловым объектом. Регулятор имеет следующий состав: блок fuzzy, база знаний нечеткого регулятора (НР), включающих в себя систему продукционных правил, машина fuzzy вывода и блок defuzzy. Структура регулятора показана на рис. 1.

Fuzzy-алгоритм позволяет осуществлять переход от четких исходных данных к нечетким исходным данным с помощью следующих операций:

1) сопряжение входных исходных данных fuzzy-регулятора, которые поступают от управляющей системы и несут сведения о параметрах объекта и его функционировании;

2) процедурная оптимизация логических правил относительно входной и выходной информации fuzzy-регулятора;

3) трансляция выходных управляющих воздействий, представленных в виде нечеткой формы в четкую форму, соответствующих формированию массива управления, направляемая в ядро системы управления.

Интеграция такого алгоритма, а впоследствии и подхода, в состав классических систем управления показана на рис. 2, где видно, что интегрируемый регулятор совместно с существующим позволяет сформировать некоторый симбиотический регулятор. Как видно из обобщенной структуры, fuzzy-часть симбиотического регулятора имеет в своем составе следующие компоненты: блок fuzzy, база знаний, включающих в себя систему продукционных правил, машина fuzzy вывода и блок defuzzy [5].

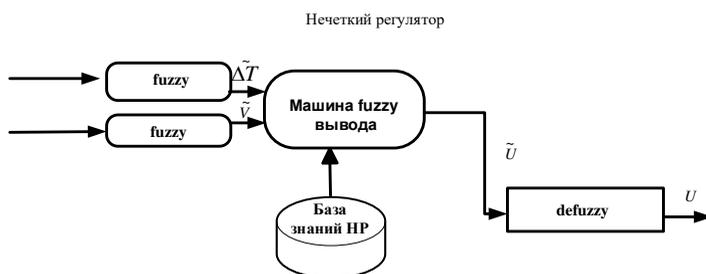


Рис. 1. Структурная схема нечеткого регулятора

Входными и выходными переменными для этого симбиотического регулятора будут являться: градиент температуры  $\Delta T$ , который задается в соответствии с технологической картой,  $V$  – переменная, показывающая технологический цикл загрузки,  $U$  – управляющее воздействие [5].

После того, как входная информация поступает на данный регулятор, происходит ее трансляция нечетко-четкого множества, которое впоследствии образует функционал принадлежности этих множеств или соответствующие нечетко-четких множеств, в результате чего формируются определенные термы, которые пригодны для обработки fuzzy-машиной. К этим термам можно отнести следующее: изменение температурного режима и технологический цикл загрузки. Fuzzy-машина в процессе взаимодействия с базой знаний, в которой находятся входные и выходные термы, представленные в виде набора функций, а также правила обработки

входных и выходных переменных при выполнении операции суммирования, движения и накопления, формирует вывод полученной информации, которая поступает на блок defuzzy. Блоки defuzzy определяют численное значение температуры  $t_k$ , вид используемой модели  $M$  и массив исходных реквизитов  $R$ . По полученным данным синтезируется необходимое управляющее воздействие  $u^*(t)$ .

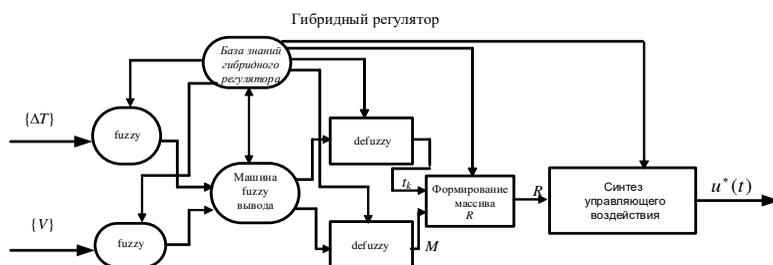


Рис. 2. Структурная схема гибридного регулятора

В зависимости от сложившейся ситуации система управления группой электрокамерных печей должна реализовывать соответствующую структуру. Выбор структуры системы и класса решаемых задач управления производится в рамках системы управления объектом.

### Вывод

Таким образом, предложенные регуляторы, в частности нечеткий и гибридный, могут легко интегрироваться в существующие системы управления и позволят функционировать при различных условиях, в том числе и при воздействии дестабилизирующих факторов, например – отказ одного из нагревательных элементов или группы элементов, если это рассматривается в случае конвейерного многомерного теплового аппарата или группы электрокамерных печей и т. д.

В результате такой модернизации в целом удастся повысить технологичность выпускаемой продукции, а также уменьшить риски в случае выхода из строя одного или нескольких элементов технологического объекта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание). Проект «Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система оперативного контроля теплофизических характеристик теплоизоляции»*

*онных материалов, применяемых в условиях Арктики. Разработка теоретических основ, методологии построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем»).*

### Список литературы

1. Муромцев, Ю. Л. Моделирование и оптимизация сложных систем при изменениях состояния функционирования / Ю. Л. Муромцев, Л. Н. Ляпин, О. В. Попова. Воронеж : Изд-во ВГУ, 1992. 164 с.
2. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений : пер. с англ. М. : Мир, 1976. 168 с.
3. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств : пер. с франц. М. : Радио и связь, 1982. 432 с.
4. Ягер, Р. Р. Нечеткие множества и теория возможностей: Последние достижения : пер. с англ. / под ред. Р. Р. Ягера. М. : Радио и связь, 1986. 408 с.
5. Артемова, С. В. Информационная система оптимального управления теплотехнологическими аппаратами : монография. М. ; СПб. ; Вена ; Гамбург : Изд-во МИНЦ, 2011. 234 с.

*O. A. Belousov*, CSc in engineering, associate professor

*D. Yu. Muromtsev*, DSc in engineering, professor

*M. A. Kudryashov*, student

*A. S. Kolmykova*, postgraduate student

*A. S. Gribkov*, DSc in engineering, professor

Email: [jiour314@gmail.com](mailto:jiour314@gmail.com)

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

### The Use of Fuzzy Logic Algorithms in Control Systems of Multidimensional Technological Objects

*Currently technological multidimensional objects are widely used, such as drying plants, electric-chamber furnaces, etc. It is proposed to use fuzzy logic algorithms (fuzzy controller) in the control systems of such objects or integrate such a controller into existing ones (hybrid), which will allow synthesizing control actions in real time under different operating conditions such as failure of one or more heating elements, violation of the process the effect of changes in temperature (unplanned loading).*

**Keywords:** fuzzy logic, multidimensional objects, control system, hybrid controller.

УДК 618.581.3

*А. Ю. Вдовин*, канд. техн. наук, доц.*Р. Р. Хамидуллин*, магистрант*В. В. Шадрин*, зав. лабораторией кафедры «Вычислительная техника»

E-mail: vt@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

## Средство имитации иницирующих воздействий на датчики оптико-электронной системы, применяемой при испытаниях стрелкового оружия

В статье обоснована актуальность применения различных средств имитации в области создания информационно-измерительных систем, применяемых при испытаниях стрелкового оружия. Разработано средство имитации иницирующих воздействий на датчики системы, описаны его возможности. Проведен анализ особенностей его функционирования и возможных функциональных ограничений на его использование.

**Ключевые слова:** имитация, датчик, оптико-электронная система, стрелковое оружие, беспроводная связь

### Введение

Производство стрелкового оружия и боеприпасов предусматривает проведение испытаний для контроля множества различных параметров: скорости пули [1], ускорений, скоростей и перемещений узлов стрелкового оружия [2] и пр. Для автоматизации процесса определения этих параметров применяются оптико-электронные и акустические информационно-измерительные системы [3–9]. Схема одного из возможных вариантов реализации оптико-электронной системы, применяемой для оценки скорости пуль [10], приведена на рис. 1.

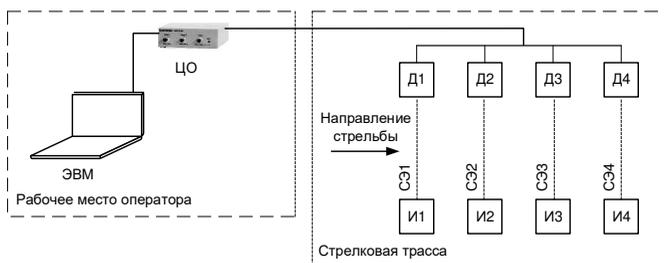


Рис. 1. Схема системы для оценки скорости пуль

На рисунке СЭ1-СЭ4 – световые экраны, образованные излучателями И1-И4 и датчиками Д1-Д4, реализованными на основе фотодиодов ФД-24К, соответственно, ЦО – цифровой виртуальный осциллограф, необходимый для временного хранения и оцифровки сигналов датчиков.

Процесс внедрения подобных систем в эксплуатацию весьма трудоемок и ресурсозатратен, что, в первую очередь, связано с необходимостью проведения большого числа стрельб на этапе предварительной настройки и отладки системы. Для решения этой проблемы создаются различные имитаторы и средства имитации. В частности, разработаны имитаторы на основе звуковой платы [11, 12]. С помощью таких имитаторов возможна, например, оценка параметров граничных режимов работы блока предварительной обработки (например, цифрового виртуального осциллографа) и его канала передачи (например, по быстродействию, что определяет максимальный темп стрельбы, поддерживаемый системой).

### **Постановка задачи**

Функциональность рассмотренных имитаторов весьма ограничена, например, с их помощью невозможно оценить работоспособность датчиков. Подобную возможность могут обеспечить средства имитации иницирующих воздействий на датчики системы, которые позволяют проверить правильность функционирования не только отдельных датчиков, но и системы в целом. Необходима разработка такого средства имитации, которое позволяло бы создавать воздействия непосредственно на датчики системы в определенной последовательности в заданные моменты времени. Это обеспечит возможность без выполнения реальных выстрелов получать на выходах датчиков импульсы с параметрами, близкими к параметрам импульсов, получаемых при испытании боеприпасов.

### **Описание эксперимента**

Схема созданного средства имитации иницирующих воздействий представлена на рис. 2.

На рисунке С1-С4 – светодиоды, позволяющие имитировать изменение светового потока от излучателя к датчикам, МК – плата на основе микроконтроллера, Пер и Пр – передатчик и приемник соответственно. Необходимо отметить, что использование беспроводного интерфейса существенно увеличивает мобильность и скорость развертывания нашей разработки, повышает удобство работы с ней. В данном случае основная программа находится на плате МК со стороны приемника, плата МК, подключенная к передатчику, лишь иницирует ее работу.

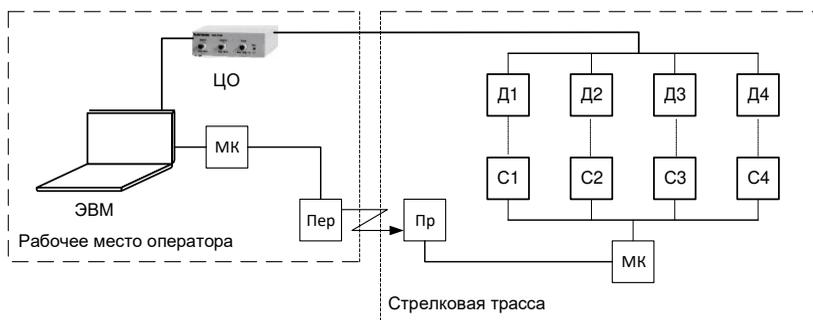


Рис. 2. Схема применения разработанного средства имитации

В качестве устройства формирования и обработки запросов был выбран 8-битный микроконтроллер семейства AVR – Atmega328 на платформе Arduino. В качестве преимуществ такого выбора можно отметить небольшую стоимость, простоту соединения периферийных устройств, возможность разработки кода в различных IDE, наличие собственной среды разработки с языком Wiring (синтаксис похож на C++) и большое количество готовых библиотек функций. Платформа поддерживает большое количество модулей, рассчитанных как на проводную передачу (Ethernet), так и на беспроводную (Wi-Fi, Bluetooth).

Для организации информационного обмена был выбран недорогой модуль радиосвязи на основе микрочипа nRF24L01. Передача данных осуществляется в диапазоне частот ISM (разрешенная полоса частот для использования в коммерческих и бытовых задачах). Чип работает в режиме приемника и передатчика, он берет на себя такие функции, как формирование пакетов, подтверждение приема, вычисление контрольной суммы и автоматическую повторную передачу.

Оценим возможности созданного имитатора. Важно проверить потенциальную пригодность созданного имитатора для оперативной проверки работоспособности автоматизированной системы на основе световых экранов. При этом принципиальны следующие требования к имитатору: генерируемые импульсы должны быть близки по основным параметрам (амплитуда, длительность) к реальным, разности моментов времени их прихода также должны достаточно хорошо соответствовать реальной ситуации.

Была проведена серия из 24 экспериментов, в каждом из которых задавались одинаковые условия работы средства имитации. Начальные условия моделирования: скорость пули 1000 м/с, экраны размещены на дальностях 8, 12, 23, 27 м от дульного среза. Задаваемая длительность свечения каждого из светодиодов 40 мкс (это значение оценивалось по реальным сигналам). Программно длительность свечения будем задавать

с помощью функции `delayMicroseconds()`. Согласно документации [13], максимальная пауза, воспроизводимая корректно с помощью этой функции, 16383 мкс, при необходимости получения большей величины можно использовать функцию `delay()`. Аналогичным образом будем задавать длительность полета пули между световыми экранами (в соответствии с дальностями установки световых экранов будем задавать 4 мс между первым и вторым, 11 мс – между вторым и третьим, 4 мс – между третьим и четвертым). При этом фактически с учетом длительности свечения получим временную длительность между импульсами на 40 мкс больше.

В каждом эксперименте оценивалась длительность полученных импульсов (на заданном уровне) и разница между моментами их прихода, кроме того, оценивалось выборочное среднеквадратическое отклонение (СКО) полученных значений. Очевидно, что амплитуда в большой степени будет определяться расстоянием между излучателем и фотоприемником, а также их взаимной ориентацией в пространстве, поэтому важно лишь проверить возможность получения сигнала с амплитудой, близкой к необходимой, что и было сделано. Необходимо отметить, что в экспериментах все светодиоды были ориентированы на один датчик системы с целью исключения возникновения дополнительных погрешностей, обусловленных возможными различиями в параметрах элементов датчиков.

### Результаты и их обсуждение

Пример сигнала, полученного при помощи созданного имитатора, приведен на рис. 3.

Результаты проведенных экспериментов приведены в табл. 1 и 2.

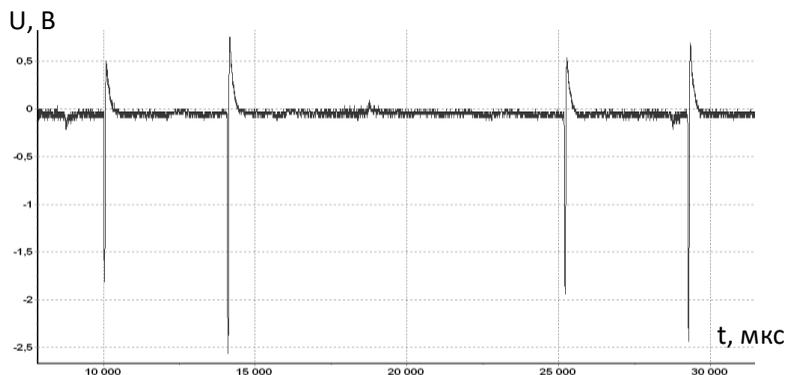


Рис. 3. Импульсы, полученные с использованием разработанного средства имитации

Таблица 1. Оценка стабильности длительности импульса

| Параметры                                  | Излучатель |       |       |       |
|--|------------|-------|-------|-------|
|  | И1         | И2    | И3    | И4    |
| Средняя длительность импульса, мкс         | 51,5       | 53,75 | 52,75 | 53,33 |
| Среднеквадратическое отклонение (СКО), мкс | 1,79       | 1,36  | 1,94  | 2,48  |

Различия в длительности импульсов, вероятнее всего, определяются несколько различной ориентацией светодиодов по отношению к датчику, а также возможными различиями параметров самих светодиодов. Полученное значение СКО свидетельствует о достаточно хорошей стабильности длительности импульсов.

Таблица 2. Оценка стабильности разностей между моментами прихода импульсов

| Параметры   | Пара излучателей |          |          |
|---|------------------|----------|----------|
|   | И1-И2            | И2-И3    | И3-И4    |
| Разность между импульсами (заданная), мкс           | 4040             | 11040    | 4040     |
| Средняя разность между импульсами (полученная), мкс | 4069,667         | 11112,67 | 4069,25  |
| Среднеквадратическое отклонение (СКО), мкс          | 1,403928         | 2,68112  | 0,989071 |
| Относительная погрешность полученной разности, %    | 0,734            | 0,658    | 0,724    |

Данные табл. 2 показывают, что разность моментов времени появления импульсов отклоняется от заданной в среднем менее чем на 1 % (это сопоставимо с результатами, полученными для имитаторов на основе звуковой платы), при этом значение СКО также невелико.

## Выводы

Приведенные результаты позволяют утверждать, что разработанное средство имитации инициирующих воздействий на датчики автоматизированной системы определения скорости пуль вполне пригодно для оценки работоспособности как отдельных датчиков, так и системы в целом; этим оно выгодно отличается от известных имитаторов на основе звуковой платы. Созданное средство имитации может быть применено уже на этапах отладки и тестирования программного обеспечения системы. При этом следует отметить, что полученные значения относительной погрешности разностей моментов времени между отдельными импульсами обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований в вопросе использования созданного средства имитации в автоматизированных системах для определения координат точки попадания (как оптико-электронных, так и акустических), поскольку в таких системах математическая модель их функционирования предусматривает срабатывание применяемых датчиков в существенно меньшем временном интервале.

### Список литературы

1. Данилин, Г. А. Основы проектирования патронов к стрелковому оружию: учебник / Г. А. Данилин, В. П. Огородников, А. Б. Заволокин ; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 374 с.
2. Алферов, В. В. Конструкция и расчет автоматического оружия. М. : Машиностроение, 1977. 248 с.
3. Афанасьева, Н. Ю. Информационно-измерительная система на основе световых экранов для испытаний стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003.
4. Вдовин, А. Ю. Современная автоматизированная система для оценки скорости перемещения затвора стрелкового оружия / А. Ю. Вдовин, Е. М. Марков, И. Г. Корнилов // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. № 3. С. 82–87.
5. Казаков, С. В. Разработка и исследование информационно-измерительной системы на основе акустических мишеней для испытаний стрелкового оружия на открытой местности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2002.
6. Марков, Е. М. Разработка методик и средств контроля параметров дробового оружия с использованием телекамеры : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2011.
7. Петухов, К. Ю. Алгоритмы обработки аналоговых сигналов при цифровых измерениях в информационно-измерительных системах для стрелкового оружия : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2003.
8. Эволюция электронных акустических мишеней: информационно-измерительные системы для стрелкового оружия / С. Ф. Егоров, В. С. Казаков, В. А. Афанасьев, И. Г. Корнилов, И. В. Коробейникова // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 4 (31). С. 104–110.
9. Егоров, С. Ф. Информационно-измерительные системы оборонного назначения: стрелковые тренажеры и электронные мишени / С. Ф. Егоров, В. В. Коробейников, В. С. Казаков // Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов : материалы науч. исследований. Ижевск, 2015. С. 328–349.
10. Вдовин, А. Ю. Разработка системы на основе световых экранов для определения внешнебаллистических параметров : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2010.
11. Вдовин, А. Ю. Создание на основе звуковой платы имитатора сигналов датчиков системы для оценки параметров движения механизмов стрелкового оружия / А. Ю. Вдовин, А. Н. Покушев, А. В. Максимова // Информационные технологии. Проблемы и решения: материалы междунар. науч.-практ. конференции. Т. 1 (5). Уфа : Изд-во УГНТУ, 2018. С. 67–71.
12. Создание на основе звуковой платы имитатора сигналов оптических датчиков автоматизированной системы для определения внешнебаллистических параметров / А. Ю. Вдовин, Е. М. Марков, А. В. Максимова, А. Н. Покушев // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3. С. 52–55.
13. Программирование Ардуино [Электронный ресурс]. URL: <http://http://arduino.ru/Reference> (дата обращения: 09.06.2019).

---

*A. Yu. Vdovin*, CSc in engineering, associate professor

*R. R. Khamidullin*, magister student

*V. V. Shadrin*, head of laboratory

E-mail: vt@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Initiating Impacts Imitator on the Sensors of the Optical-Electronic System Used in Small Arms Testing**

*The article substantiates the relevance of the use of various imitators in the field of creating information-measuring systems used in small arms testing. A means of imitating the initiating impacts on the sensors of the system has been developed, its capabilities have been described. The analysis of the features of its functioning and possible functional limitations on its use is carried out.*

**Keywords:** imitation, sensor, optoelectronic system, small arms, wireless communication.

УДК 621.3.049.75 + 338

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

*К. К. Перевозчиков*, соискатель

*Е. С. Трифонова*, аспирант

E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Реализация программы импортозамещения на примере узла системы управления твердотельного волнового гироскопа**

*В статье рассматриваются проблемы импортозамещения электронной компонентной базы (ЭКБ) узла системы управления твердотельного волнового гироскопа (ТВГ). Представлен результат замены импортной ЭКБ на отечественную на примере высоковольтного блока питания (ВВ БП).*

**Ключевые слова:** импортозамещение, твердотельный волоновой гироскоп, система управления, электронная компонентная база.

### **Введение**

В настоящее время одними из актуальных и перспективных разработок гироскопических приборов является твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) на основе полусферического резонатора, который является достаточно точным прибором с относительно простой конструкцией и невысокой стоимостью [1, 2]. Принцип его действия основан на инертных свойствах стоячих упругих волн, которые, под действием сил Кориолиса, подвергаются прецессии как относительно оболочки, так и в инерциальном пространстве [3].

Одним из производителей таких гироскопических блоков является АО «ИЭМЗ «Купол». На данный момент некоторые узлы блоков включают в себя импортные электронные компоненты по причине их низкой стоимости, малых габаритов и большего функционала. Вследствие санкций, начавшихся в 2014 г., а также с целью поддержки отечественного производителя, повышения конкурентоспособности отечественной продукции и помощи в освоении новых видов продукции необходимость импортозамещения стала крайне актуальной [4].

Кроме того, некоторые блоки ТВГ производятся для военно-промышленного комплекса, поэтому необходим полный переход на отечественную ЭКБ для получения независимости от зарубежных партнеров.

### Постановка задач

Реализация программы импортозамещения будет рассмотрена на примере узла системы управления ТВГ – высоковольтного блока питания (ВВ БП). При переходе на отечественную ЭКБ необходимо обеспечить выходные параметры узлов не хуже, чем были при использовании импортной ЭКБ.

Первой задачей является поиск возможных замен импортных элементов на отечественные с учетом их характеристик.

Вторая задача – это проектирование БП, а именно разработка схемы электрической принципиальной (ЭЗ), размещение электрорадиоизделий (ЭРИ) на печатной плате (ПП) и трассировка печатного рисунка.

### Блок питания на импортной ЭКБ

На рис. 1 представлена ЭЗ блока питания на импортной ЭКБ.

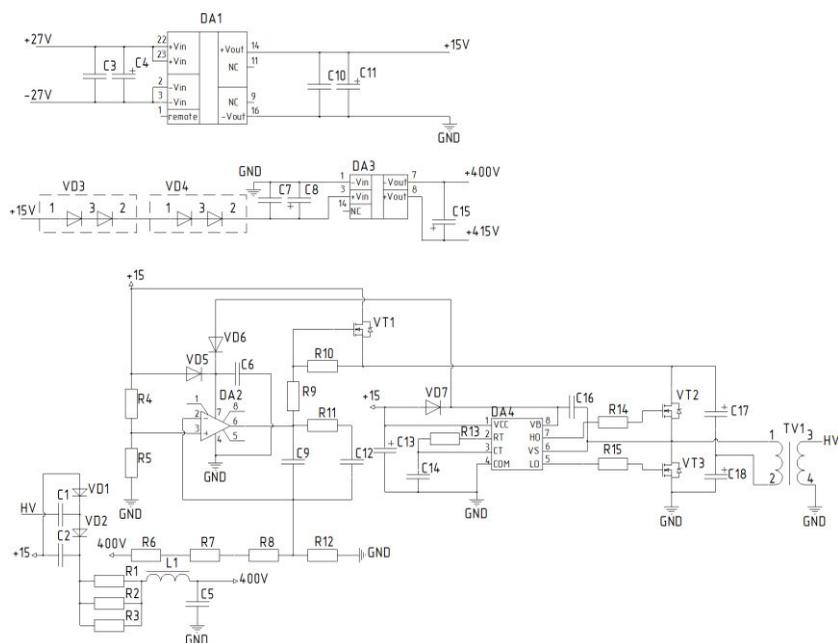


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная ВВ БП на импортной ЭКБ

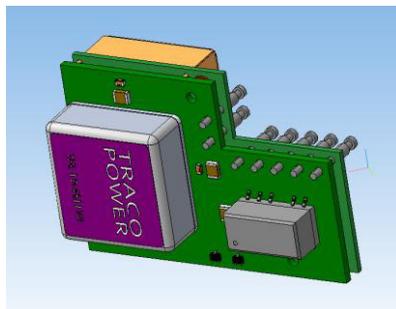
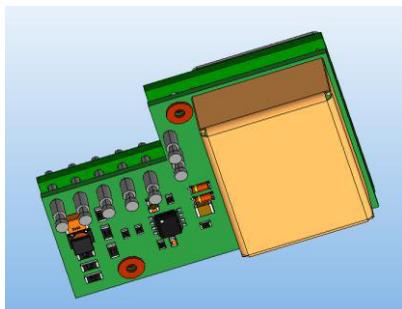
Для начала необходимо найти отечественную замену для аналоговых блоков (источников питания и микросхем), так как от этого будет зави-

сеть дальнейшая схемотехника блока. На схеме использованы вторичные источники питания <sup>1</sup> и микросхемы <sup>2</sup> согласно табл. 1.

**Таблица 1. Используемые аналоговые блоки в ВВ БП на импортной ЭКБ**

| Позиционное обозначение | Наименование                     | Назначение   |
|-------------------------|----------------------------------|--|
| DA1                     | THD12-2413WI<br>ф. «TRACO POWER» | DC/DC преобразователь, преобразующий входное напряжение $\pm 27$ В в +15 В                           |
| DA2                     | TES1-1213V<br>ф. «TRACO POWER»   | DC/DC преобразователь, преобразующий напряжение +400 В в +415 В                                      |
| DA3                     | OP07CSZ ф. «Analog Devices»      | Операционный усилитель, обеспечивающий обратную связь для поддержания постоянных выходных параметров |
| DA4                     | IR2153STRPBF<br>ф. «Infineon»    | Самотактируемый полумостовой драйвер силового транзистора  |

На рис. 2 представлена 3D-модель ВВ БП на импортной ЭКБ. Так как количество ЭРИ на схеме велико, а размеры ПП жестко ограничены, то данный печатный узел с монтажом выполнен на двух соединенных ПП.



*Рис. 2. 3D-модель ВВ БП на импортной ЭКБ*

<sup>1</sup> Техническое описание на DC/DC Converters THD 12WI Series, 12 Watt // Предприятие «TRACO POWER» [Офиц. сайт].

Техническое описание на DC/DC Converters TES 1V Series, 1 Watt // Предприятие «TRACO POWER» [Офиц. сайт].

<sup>2</sup> Техническое описание на Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier OP07 // Предприятие «ANALOG DEVICES» [Офиц. сайт].

Техническое описание на Self-Oscillating Half-Bridge Driver IR2153(D)(S) &(PbF) // Предприятие «Infineon» [Офиц. сайт].

### Результат импортозамещения

На рис. 3 представлена вновь разработанная ЭЗ блока питания на отечественной ЭКБ. Удалось заменить все компоненты схемы на российские.

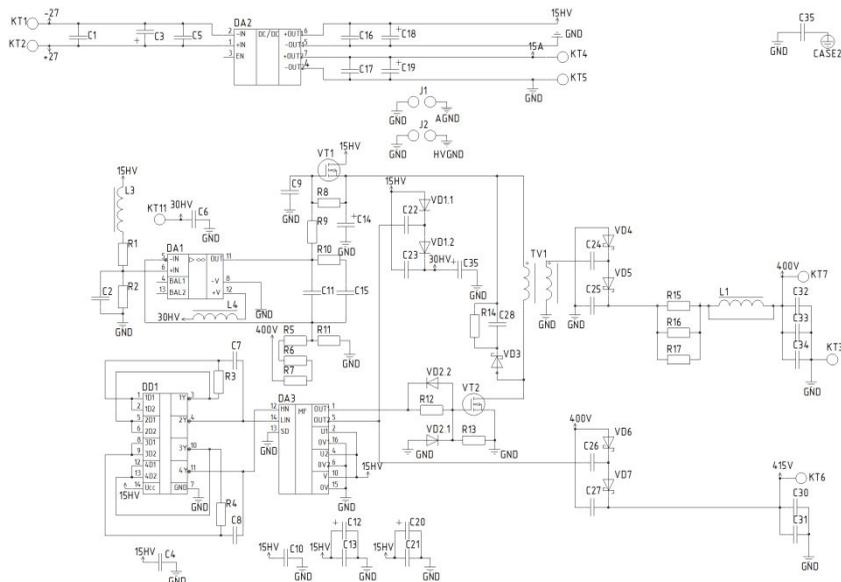


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная ВВ БП на отечественной ЭКБ

Согласно табл. 2 произведены замены источников питания<sup>3</sup> и микросхем<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Техническое описание на DC/DC преобразователь серии «Мираж-ЕП» 18 Вт // Предприятие ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания» [Офф. сайт].

Техническое описание на микросхему 544УД12УЗ АЕЯР.431130.358 ТУ // Предприятие ФГУП «НПП «ВОСТОК» [Офф. сайт].

<sup>4</sup> Каталог изделий «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» // Предприятие ЗАО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ» [Офф. сайт].

Техническое описание на микросхему 564ЛА7В БК0.347.064ТУ1/02 // Предприятие ОАО «ОКБ «ЭКСИТОН» [Офф. сайт].

Таблица 2. Используемые аналоговые блоки в ВВ БП на отечественной ЭКБ

| Новое позиционное обозначение | Старое позиционное обозначение | Наименование                        | Назначение  |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---|
| DA1                           | DA2                            | МДМ18-2Е1515ВП<br>БКЮС.430609.002ТУ | Модуль питания, преобразующий входное напряжение $\pm 27$ В в +15 В   |
| DA2                           | -                              | -                                   | -   |
| DA3                           | DA1                            | 544УД12У3<br>АЕЯР.431130.358ТУ      | Прецизионный операционный усилитель, обеспечивающий обратную связь для поддержания постоянных выходных параметров |
| DA4                           | DA3                            | 1308ЕУ3АУ<br>АЕЯР.431420.665-03ТУ   | Двухканальный драйвер затворов МОП транзисторов высоковольтного полумоста   |
|                               | DD1                            | 564ЛА7В<br>БК0.347.064ТУ1/02        | Микросхема с четырьмя логическими элементами 2И-НЕ, необходимая для создания тактового генератора                 |

DC/DC преобразователь THD12-2413WI ф. «TRACO POWER» и операционный усилитель OP07CSZ ф. «Analog Devices» удалось подобрать с сохранением всех параметров, за исключением габаритных размеров.

DC/DC преобразователь TES1-1213V ф. «TRACO POWER» больше не требуется из-за изменения схемотехники ВВ БП, а именно введения в схему преобразователя напряжения по типу умножителя.

Отсутствие в отечественной ЭКБ аналога микросхемы IR2153STRPBF ф. «Infineon» вынудило усложнить ЭЗ и разделить ее функции между двумя отечественными микросхемами 1308ЕУ3АУ и 564ЛА7В согласно табл. 2.

При размещении ЭРИ и трассировке ПП выяснилось, что прежнего размера ПП не достаточно. Было принято решение увеличить размер ПП, что повлекло за собой изменение геометрии корпуса блока ТВГ.

На рис. 4 представлена 3D-модель ВВ БП на отечественной ЭКБ, на которой видно, что количество ЭРИ и плотность монтажа увеличена. Также, в отличие от БП на импортной ЭКБ, применение отечественной ЭКБ, ввиду особенностей схемотехнических решений и ограниченности используемого пространства, вынуждает применять двусторонний монтаж.

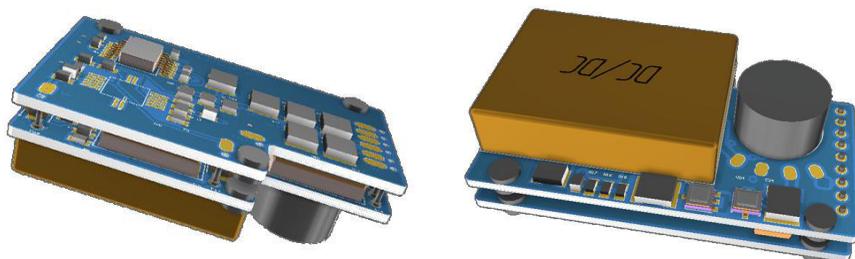


Рис. 4. 3D-модель ВВ БП на отечественной ЭКБ

### Выводы

Как видно из схемы (рис. 3) и 3D-модели (рис. 4) ВВ БП, переход на отечественную ЭКБ возможен, но вследствие отсутствия полных аналогов многих ЭРИ (в частности микросхем) и медленного развития отечественной полупроводниковой техники разработчики сталкиваются с проблемой нехватки места при размещении ЭРИ на ПП и ее трассировке. Зачастую из-за невозможности увеличить габариты печатного узла, они вынуждены жертвовать каким-либо функционалом электронных блоков.

В настоящий момент создан макетный образец представленной схемы ВВ БП, который удовлетворяет заданным выходным параметрам и габаритным размерам.

### Список литературы

1. *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. 126 с.
2. *Журавлев, В. Ф.* Волновой твердотельный гироскоп / В. Ф. Журавлев, Д. М. Климов. М. : Наука, 1985. 168 с.
3. *Басараб, М. А.* Математическое моделирование физических процессов в гироскопии : монография / М. А. Басараб, В. Ф. Кравченко, В. А. Матвеев. М. : Радиотехника, 2005. 176 с.
4. *Соловьев, А. И.* Импортозамещение в России: проблемы и пути решения // Экономика. Налоги. Право. 2016. № 4. С. 66–71.

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

K. K. Perevozchokov, postgraduate student

E. S. Trifonova, postgraduate student

E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Implementation of Import Substitution Program on the Example of Solid-State Wave Gyroscope Control System Node**

*This article considers with the problems of import substitution of the electronic component base of the control system node of the solid-state wave gyroscope. The result of replacement of the imported electronic component base with the Russian one on the example of high-voltage power supply is presented.*

**Keywords:** import substitution, solid-state gyroscope, control system, electronic component base

---

УДК 621.315.177

*А. В. Желтышев*, ст. преподаватель

E-mail: avg.13@mail.ru

*Д. Г. Шлыков*, студент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Повышение эффективности поиска мест повреждений на воздушных линиях в сетях с изолированной нейтралью**

*Короткие замыкания в электрических сетях. Переходный процесс при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью. Анализ существующих способов поиска мест повреждения в электрических сетях, их преимуществ и недостатков. Предложение способа повышения эффективности существующих методов. Разработка функциональной схемы системы поиска и выявления места повреждения.*

**Ключевые слова:** система, поиск, короткое замыкание в сети с изолированной нейтралью.

### **Введение**

В электрических сетях периодически возникают различные технологические нарушения, среди которых наиболее частые – это всевозможные виды коротких замыканий. При этом степень тяжести такого нарушения для электрической сети зависит от режима ее работы.

Двухфазные и трехфазные короткие замыкания оказывают одинаковое воздействие на электрическую сеть не зависимо от ее режима работы. Однофазные же замыкания в электрической сети, работающей в режиме с изолированной нейтралью, не влияют на работу потребителей в отличие от сети, работающей в режиме с заземленной нейтралью, где такие повреждения приводят к отключению поврежденной линии [2].

Если рассмотреть однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) как переходный процесс от начала деградации диэлектрика изолятора провода воздушной линии, установленного на опоре, до возникновения металлического однофазного замыкания (электрический пробой изолятора) одной фазы (рис. 2, фаза *A*) на землю в электрической сети с изолированной нейтралью и проанализировать векторную диаграмму напряжений этого процесса, можно сделать следующие выводы:

1. В нормальном режиме работы фазные напряжения ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ) всех фаз равны между собой и симметричны (рис. 1, *a*)).

2. При возникновении переходного процесса (рис. 1, б)) напряжение поврежденной фазы ( $U_A$ ) начинает снижаться, а фазные напряжения неповрежденных фаз ( $U_B, U_C$ ) начинают возрастать.

3. После окончания переходного процесса (рис. 1, в)) величина напряжения поврежденной фазы ( $U_A$ ) относительно земли стремится к нулю, а величина напряжений двух неповрежденных фаз ( $U_B, U_C$ ) будет стремиться к значению линейного напряжения при неизменном значении линейных напряжений ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ).

Этот процесс происходит по всей электрически связанной сети, что негативным образом сказывается на фазной изоляции элементов сети.

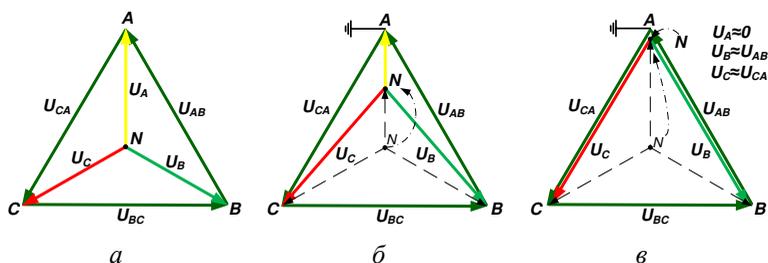


Рис. 1. Векторные диаграммы напряжений: а – нормальный режим работы; б – ОЗЗ через переходное сопротивление; в – ОЗЗ при нулевом переходном сопротивлении

Из сказанного выше следует, что ввиду отсутствия перебоя в электроснабжении однофазное замыкание не является аварийным режимом, но может послужить причиной дальнейшего развития технологического нарушения, что в свою очередь приведет к перебою в электроснабжении потребителей. Поэтому место возникновения однофазного замыкания должно быть в кратчайшие сроки выявлено, изолировано и устранено.

Существующие сегодня методы поиска мест возникновения однофазного замыкания можно разделить на две группы:

1. Топографический.
2. Дистанционный.

Топографический метод – это определение топографической точки (места), где произошло повреждение изоляции. При этом необходимо перемещаться со специальной аппаратурой вдоль всей трассы прохождения воздушной линии, что само по себе не может обеспечить необходимое быстродействие и требует значительных затрат времени и сил, но этот метод обеспечивает необходимую точность.

Дистанционный метод – это определение расстояния (дистанции) до точки, где произошло повреждение изоляции. Этот способ обеспечивает необходимое быстродействие, но не обеспечивает необходимой точности [1].

### Постановка задачи

Для воздушных линий электропередач характерными повреждениями являются: повреждение изоляторов одного из проводов линии, обрыв провода одной или нескольких фаз, перехлест проводов и т. п. В большинстве случаев – это однофазные замыкания, причинами возникновения которых являются: атмосферные перенапряжения, колебания температуры окружающей среды, образование гололеда на проводах, загрязнение окружающего воздуха и т. д.

Разнообразие видов и характера повреждений, а также структуры и условий работы электрических сетей не позволяет получить какой-либо универсальный метод определения места повреждения.

На рис. 2 показан источник ( $E_A, E_B, E_C$ ), обмотки которого соединены в звезду с изолированной от земли нейтралью, подключенный к проводам электрической сети, каждый провод которой имеет связь с землей, через активное ( $R_{x_{CA}}, R_{x_{CB}}, R_{x_{CC}}$ ) и реактивное ( $X_{x_{CA}}, X_{x_{CB}}, X_{x_{CC}}$ ) сопротивление.

Рассмотрим случай возникновения короткого замыкания одной из фаз линии электропередач на землю, в сети с изолированной нейтралью, например фазы  $A$  (рис. 2, б)). На рисунке видно, что при однофазном замыкании сеть имеет только одну точку связи с землей, поэтому короткозамкнутого контура для протекания тока короткого замыкания между источником и местом повреждения нет. Однако через место повреждения будет протекать ток, величина которого определяется суммарной емкостной проводимостью фаз сети относительно земли, и ток при этом будет носить емкостной характер.

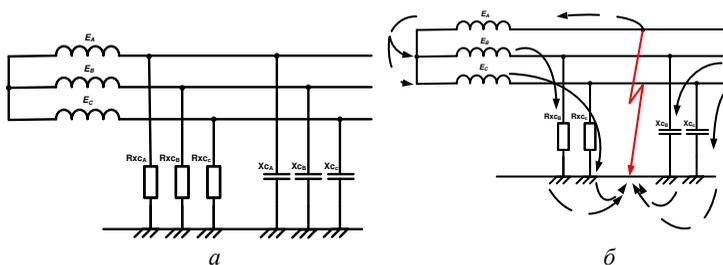


Рис. 2. Схема замещения исправной ВЛ (а); схема протекания токов утечки при ОЗЗ (б)

Общим требованием к устройствам определения места повреждения, используемым на всех типах и классах линий электропередач, является быстрота и точность. Поэтому только совокупность устройств позволит решить задачу по быстрому и точному определению места возникновения короткого замыкания в электрической сети с изолированной нейтралью [1].

### Решение задачи

Предлагаемая система определения места повреждения позволяет объединить разные методы в единую структуру и обеспечить быстрое и точное определение места повреждения на воздушных линиях электропередачи.

Функциональная схема предлагаемой системы показана на рис. 3. Она включает в себя такие функциональные узлы, как:

- модулятор-регистратор,
- высокочастотный канал связи;
- автономный датчик.

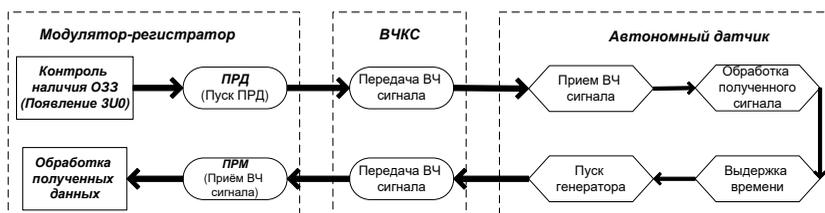


Рис. 3. Функциональная схема системы поиска и выявления мест однофазных замыканий

Модулятор-регистратор (МР) устанавливается на подстанции, в распределительном устройстве, подключается к шинам высокого напряжения и осуществляет мониторинг всей электрически связанной сети. При появлении в контролируемой сети однофазного замыкания МР производит пуск высокочастотного генератора (ПРД), который генерирует в электрическую сеть, к которой подключен высокочастотный сигнал (ВЧС).

ВЧС будет приниматься автономными датчиками, установленными на проводах воздушных линий, подключенных к шинам распределительного устройства, где установлен МР. При приеме высокочастотного (ВЧ) сигнала приемником (ПРМ), датчик (после обработки поступившей информации) через определенную заранее установленную выдержку времени формирует свой высокочастотный сигнал (с помощью встроенного генератора) в направлении распределительного устройства по тому же каналу связи (провод линии электропередач).

При приеме сигнала от датчиков модулятор-регистратор обрабатывает поступившие данные, определяет участок сети, где произошло однофазное

замыкание, и в автоматическом режиме информирует персонал, занимающийся эксплуатацией данной электроустановки, о месте повреждения.

### **Вывод**

Использование в рамках предлагаемой системы знаний о принципах работы высокочастотных каналов связи по проводам воздушных линий и характеристиках переходного процесса при однофазном замыкании в электрической сети позволяет объединить точность топографического метода и быстрдействие дистанционного, что позволит значительно сократить время поиска места повреждения, а значит и повысить надежность электроснабжения потребителей электрической энергии.

Сокращение издержек при эксплуатации электрических сетей и повышение надежности электроснабжения относятся к ключевым показателям эффективности сетевых компаний, занимающихся эксплуатацией электрических сетей, поэтому предлагаемые решения носят актуальный характер.

### **Список литературы**

1. *Аржанников, Е. А.* Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов ; под ред. В. А. Шуина. М. : Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

2. *Федосеев, А. М.* Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. для вузов / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. Репр. воспр. изд. 1992 г. М. : Изд. дом МЭИ, 2018. 528 с. : ил.

3. *Силаев, Ю. М.* Способы и средства поиска повреждений в электросетях 6–35 кВ / М-во энергетики и электрофикации СССР. Главниипроект. Центр науч.-техн. информации по энергетике и электрификации «Информэнерго». М., 1973. 32 с.

*A. V. Zheltyshev, senior lecturer*

*E-mail: avg.13@mail.ru*

*D. H. Shlykov, student*

*Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation*

### **Improving the Efficiency of the Search of Places of Damage of Overhead Lines in Networks with Isolated Neutral**

*Short circuits in electrical networks. The transition process in a single-phase earth fault in an electrical network with an isolated neutral. Analysis of existing ways to find fault locations in electrical networks of their advantages and disadvantages. Propose a way to improve the effectiveness of existing methods. Development of the functional scheme of the system of search and identification of the place of damage.*

**Keywords:** system, search, short circuit in electrical network with isolated neutral.

УДК 007.52

*Ю. Л. Караваев*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: karavaev\_yury@istu.ru

*С. И. Леконцев*, магистрант

E-mail: stas.lekontsev@ya.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Разработка системы стабилизации и управления движением мобильного двухколесного балансирующего робота**

*Работа посвящена разработке системы управления балансирующего робота. Конструктивно балансирующий робот представляет собой двухколесную платформу, центр масс которой расположен выше осей вращения колес, что делает его не устойчивым. Представлена математическая модель, на основании которой разработана система стабилизации и управления движением двухколесного балансирующего робота, представляющая собой комбинацию линейно-квадратичного регулятора и ПД-регулятора, приведены результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** нелинейная система, мобильный робот, балансирующий робот, линейно-квадратичный регулятор, ПД-регулятор.

#### **Введение**

В последние несколько лет по всему миру в различных лабораториях получили развитие исследования, связанные с высокомобильными конструкциями роботов [1, 2]. Такие разработки характеризуются способностью поддерживать баланс в заданном положении, а также возможностью вращаться на месте. Благодаря своей маневренности, балансирующие роботы могут с легкостью перемещаться по различным типам местности, поворачивать на любой угол, используя минимум пространства, а также применяться на производстве и складах с ограниченной площадью.

Конструкция мобильного двухколесного балансирующего робота с математической точки зрения представляет собой перевернутый маятник, а значит, является неустойчивой. Для поддержания равновесия в верхнем положении робот должен компенсировать угол отклонения маятника от вертикальной оси перемещением основания вдоль горизонтали, так как объект представляет собой механическую систему с ограниченной подвижностью, то есть, не может регулировать непосредственно угловое ускорение маятника. Дополнительная сложность, возникающая при проектировании системы управления балансирующим роботом, связана с тем,

что необходимо контролировать три выходных параметра системы – угол отклонения маятника от вертикали, величину линейного перемещения и угол поворота робота вокруг вертикальной оси.

### **Анализ научно-технических разработок**

В работе [3] рассмотрено создание модели балансирующего робота с ПД-регулятором угла отклонения маятника и нечетким ПД-регулятором скорости перемещения робота, проведено сравнение нечеткого ПД-регулятора и обычного ПИД-регулятора. Авторы работы [4] предлагают стратегию управления, которая раскладывается на последовательность шагов и переводят маятник из нижнего устойчивого положения равновесия в верхнее неустойчивое при условии, что движение основания строго горизонтально. В работе [5] используется линейная система управления, которая обеспечивает устойчивость линеаризованной модели перевернутого маятника с ограничениями на траектории.

В рассмотренных работах предлагаются различные варианты регуляторов стабилизации маятника и перемещения робота. Система с наилучшими результатами регулирования как стабилизации маятника, так и отслеживания перемещения разработана с использованием линейно-квадратичного регулятора [6]. Несмотря на качественный анализ математической модели и синтез регулятора стабилизации угла отклонения маятника, в рассмотренных работах отсутствует регулятор угла поворота робота вокруг вертикальной оси – управление поворотом робота осуществляется с помощью разомкнутой системы, что не позволяет добиться точного управления при решении прямой, обратной задач кинематики и движении вдоль заданной траектории.

Целью данной работы является разработка системы стабилизации и управления мобильным двухколесным балансирующим роботом с использованием комбинации линейно-квадратичного и ПД-регуляторов.

### **Математическая модель робота**

Непосредственно перед разработкой системы стабилизации и управления двухколесным балансирующим роботом необходимо вывести его математическую модель, которая отражает закон изменения выходных параметров объекта от входных сигналов. На основании этих зависимостей требуется выбрать способ управления роботом и рассчитать коэффициенты регуляторов.

На рис. 1 приведено схематическое изображение робота. При описании математической модели робота удобнее рассматривать динамические модели основания и маятника по отдельности.

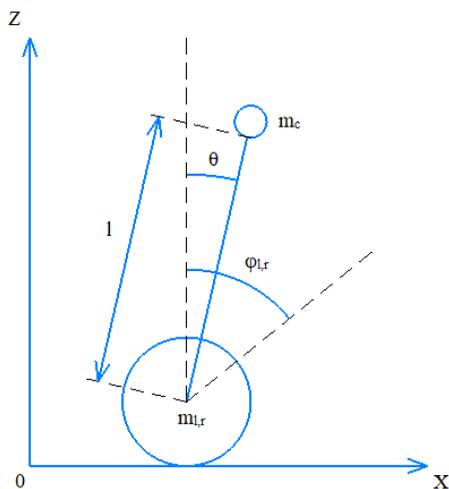


Рис. 1. Схематическое изображение робота

Математическая модель, описывающая динамику основания робота, получена исходя из второго закона Ньютона:

$$2 \cdot \left( m_k + \frac{J_k}{r^2} \right) \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{M_{дл} + M_{дп}}{r} - (H_l + H_p), \quad (1)$$

где  $m_k$  – масса колеса;  $J_k$  – момент инерции колеса,  $x$  – координата середины основания робота на оси  $Ox$ ;  $M_{дл}$ ,  $M_{дп}$  – крутящий момент левого и правого электродвигателей;  $H_l$ ,  $H_p$  – горизонтальные силы реакции со стороны колес;  $r$  – радиус колеса.

Вращательное движение перевернутого маятника вызывается действием двух сил – силы тяжести и силы, которая связана с ускорением основания робота. Момент силы, которая вызывается ускорением основания, равен  $-m_c l \ddot{x} \cos \theta$ , а момент силы тяжести равен  $m_c l g \sin \theta$ . Подставляя моменты сил в основное уравнение динамики вращательного движения, находим математическую модель обратного маятника:

$$(J_c + m_c l^2) \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = m_c l g \sin \theta - m_c l \ddot{x} \cos \theta, \quad (2)$$

где  $J_c$  – момент инерции центра масс маятника;  $m_c$  – масса центра масс маятника;  $l$  – длина радиус-вектора центра масс;  $\theta$  – угол отклонения маятника от вертикальной оси;  $g$  – ускорение свободного падения.

Поворот робота вокруг вертикальной оси  $Oz$ , а также линейное перемещение осуществляется использованием в конструкции дифференциального привода – расположенных на одной оси вращения двух двигателей, управляемых независимо друг от друга. В зависимости от приложенного к обмоткам двигателей напряжения можно получить различные типы сложных траекторий движения. На рис. 2 указаны силы, действующие при движении и повороте робота в плоскости  $Oxy$ .

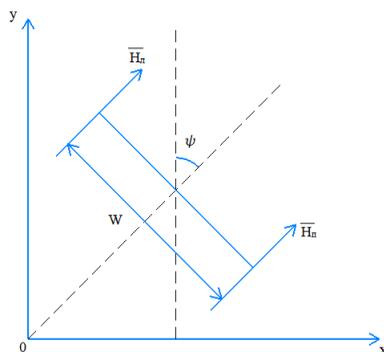


Рис. 2. Силы, действующие на робот в плоскости  $Oxy$

Математическая модель динамики движения робота в плоскости  $Oxy$  описывается вторым законом Ньютона для вращательного движения:

$$\left( m_k r + \frac{J_k}{r} + \frac{2J_\psi r}{W} \right) \cdot \frac{d^2\psi}{dt^2} = M_{дл} - M_{дп}, \quad (3)$$

где  $J_\psi$  – момент инерции робота вокруг оси  $Oz$ ;  $W$  – расстояние между колесами робота;  $\psi$  – угол поворота робота вокруг оси  $Oz$ .

Полученные математические модели в пространстве состояний примут следующий вид:

$$\begin{matrix} M_{дл} + M_{дп} \\ \begin{pmatrix} x'' \\ \theta'' \\ \psi'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ \theta' \\ \psi' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_{дл} \\ M_{дп} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

### Кинематическое описание движения робота

Разрабатываемый робот должен двигаться, принимая команды с передающего устройства, где пользователем задается линейная скорость и угол поворота робота, или перемещаться в точку с заданными координатами.

тами. В первом случае необходимо решить прямую задачу кинематики, то есть по заданной скорости и углу поворота определить конечное положение робота, во втором – зная координаты точки в пространстве, найти необходимый угол поворота робота и расстояние, которое требуется пройти, то есть решить обратную задачу кинематики. Обе задачи распишем, рассматривая перемещение в локальной системе координат, связанной с роботом, приведенной на рис. 3.

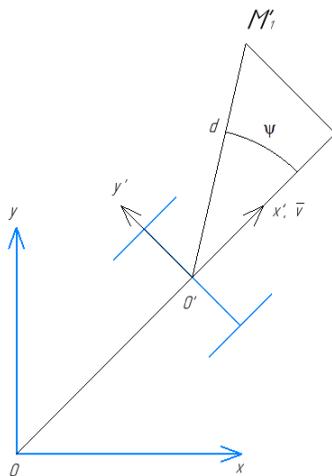


Рис. 3. Робот в локальной системе координат  $0'x'y'$

Для начала рассмотрим решение прямой задачи кинематики. Пусть  $v$  – заданная линейная скорость робота;  $\psi$  – заданный угол поворота робота, найдем координаты конечного положения робота в плоскости  $Oxy$ :

$$\begin{cases} x_1 = x' + \int_{t_0}^{t_1} v dt \cdot \cos \psi, \\ y_1 = y' + \int_{t_0}^{t_1} v dt \cdot \sin \psi, \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_1, y_1$  – конечные координаты робота;  $x', y'$  – координаты начального положения робота;  $\psi$  – заданный угол поворота робота.

Система, описывающая решение обратной задачи кинематики, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_1} v dt = \frac{dx}{\cos\psi}, \\ \int_{t_0}^{t_1} v dt = \frac{dy}{\sin\psi}, \\ \psi = \operatorname{arctg} \frac{dy}{dx}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $v$  – линейная скорость робота;  $dx$  – расстояние на оси  $Ox$  между  $M_0$  и  $M_1$ ;  $dy$  – расстояние на оси  $Oy$  между  $M_0$  и  $M_1$ ;  $\psi$  – угол между курсовой скоростью робота и радиус-вектором.

### Система управления мобильным двухколесным балансирующим роботом

Так как модель разрабатываемого двухколесного балансирующего робота является многомерной системой (ММО), то в качестве регулятора выбран линейно-квадратичный регулятор (ЛКР), контролирующей две задаваемые величины – угол отклонения маятника от вертикальной оси и перемещение робота. ЛКР – оптимальный регулятор, который использует квадратичный функционал качества:

$$J = x^T(T)Fx(T) + \int_{t_0}^T (x^T Qx + u^T Ru + 2x^T Nu) dt, \quad (7)$$

где матрица  $R$  – затраты системы на управление; матрица  $Q$  – цена отклонения системы от нуля;  $T$  – заданное время;  $x$  – матрица состояния системы.

Закон управления по отрицательной обратной связи должен минимизировать данный функционал:

$$u = -Kx, \quad (8)$$

где  $K$  – матрица коэффициентов, значения которой вычислены решением уравнения Риккати:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = -\left(\frac{K}{R^{-1}B^T}\right)', \quad (9)$$

$$K = [-0.3162 \quad -0.3303 \quad -2.3829 \quad -0.4363]. \quad (10)$$

Для контроля угла поворота робота вокруг оси  $Oz$  был выбран ПД-регулятор, коэффициенты которого были выбраны методом численного моделирования в программе Matlab:

$$K_p = 0.0166, K_d = 0.1591, \quad (11)$$

где  $K_p$  – пропорциональный коэффициент ПД-регулятора;  $K_d$  – дифференциальный коэффициент ПД-регулятора.

### Моделирование системы в Simulink

Для исследования работоспособности полученной системы управления были разработаны две модели объекта в программе Simulink. Одна модель представляет собой двухколесный балансирующий робот с решением прямой задачи кинематики (рис. 4), другая – модель робота с решением обратной задачи кинематики (рис. 5).

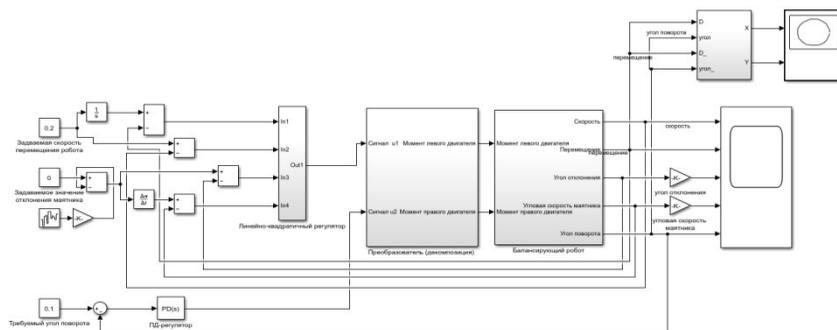


Рис. 4. Модель робота в Simulink с решением прямой задачи кинематики

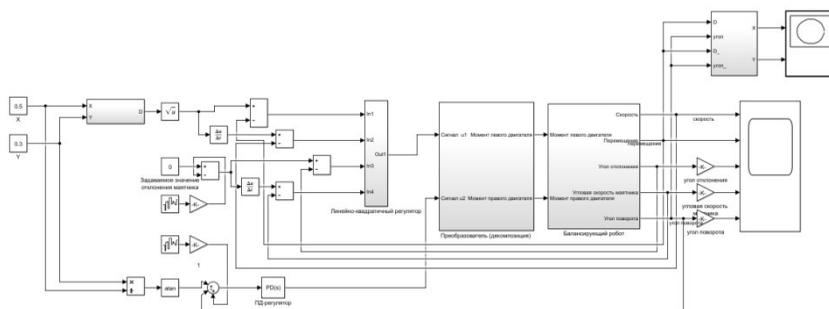


Рис. 5. Модель робота в Simulink с решением обратной задачи кинематики

Разработанные в Simulink модели робота были промоделированы с заданием различных параметров на входе. Результаты моделирования системы, в которой решается первая задача кинематики, приведены на рис. 6, для второй модели с решением обратной задачи кинематики на рис. 7 соответственно.

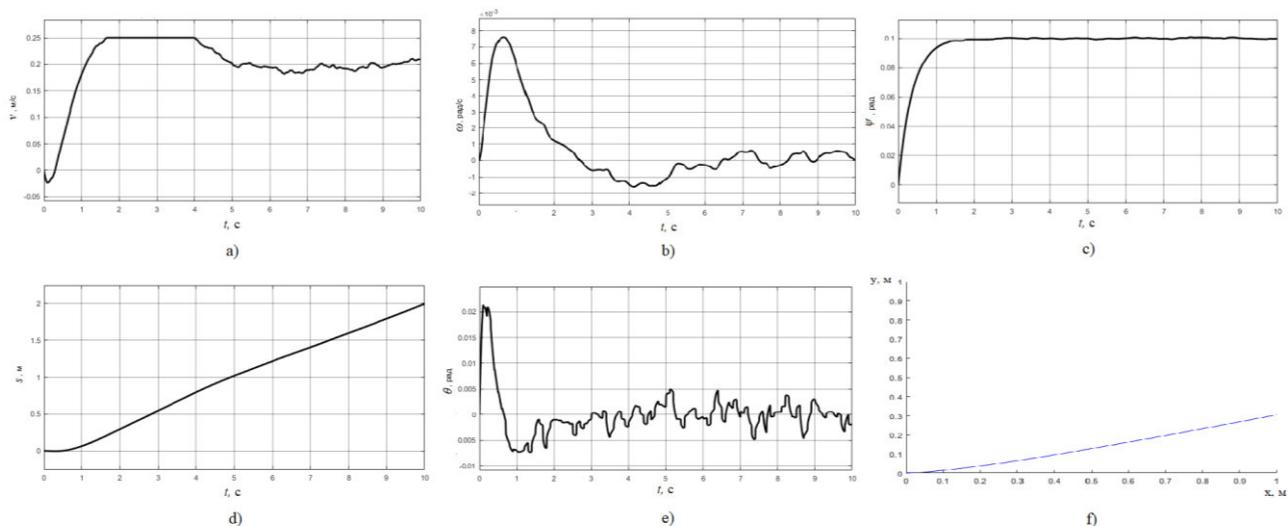


Рис. 6. Графики изменения выходных величин при  $v = 0,2$  м/с,  $\psi = 0,1$  рад.: *a* – линейной скорости, *b* – угловой скорости маятника, *c* – угла поворота робота, *d* – линейного перемещения основания, *e* – угла отклонения маятника, *f* – траектории робота

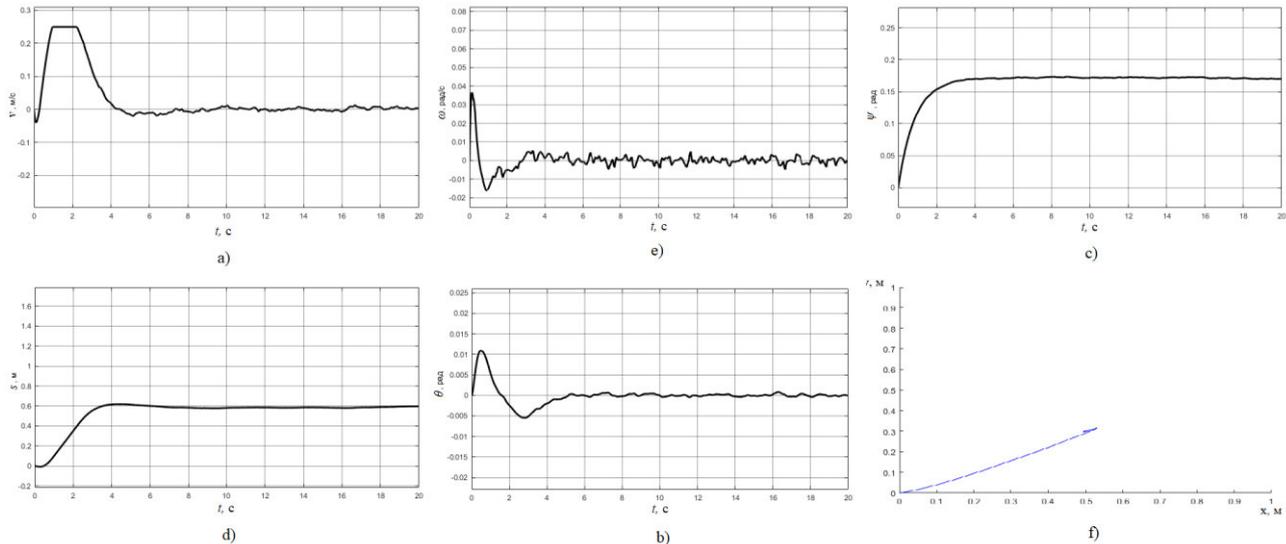


Рис. 7. Графики изменения выходных величин при  $x=0,5$  м,  $y=0,3$  м:  
 $a$  – линейной скорости,  $b$  – угловой скорости маятника,  $c$  – угла поворота робота,  
 $d$  – линейного перемещения основания,  $e$  – угла отклонения маятника,  $f$  – траектории робота

Как видно из графиков, представленных на рис. 6, 7, система стабилизации и управления движением робота приводит угол маятника в стабильное состояние, положение робота изменяется в соответствии с заданием. Однако на траектории движения робота на рис. 7 наблюдается небольшое перерегулирование, которое несущественно влияет на точность движения и связано с тем, что регулятор стремится компенсировать угол отклонения маятника при торможении робота.

### **Вывод**

Разработанная система автоматического управления решает несколько задач – стабилизирует неустойчивый объект, контролирует величину линейного перемещения робота и угол его поворота. Время стабилизации объекта не превышает 5 секунд, угол отклонения не более 0,015 радиан, что является приемлемым показателем. Перерегулирование линейного перемещения и угла поворота робота вокруг оси не превышает 5 %, что является допустимым.

### **Список литературы**

1. *Килин, А. А.* Кинематическая модель управления сферороботом с неуровновешенной омниколесной платформой / А. А. Килин, Ю. Л. Караваев // *Нелинейная динамика*. 2014. Т. 10, № 4. С. 497–511
2. *Караваев Ю. Л.* Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой / Ю. Л. Караваев, А. А. Килин // *Нелинейная динамика*. 2015. Т. 11, № 1. С. 187–204.
3. *Wu, J.* A two-wheeled self-balancing robot with the fuzzy PD control method / J. Wu, W. Zhang, S. Wang // *Math. Problems Eng.* 2012. Art. no. 469491.
4. *Wei, Q.* Nonlinear controller for an inverted pendulum having restricted travel / Q. Wei, W. P. Dayawansa, W. S. Levine // *Automatica*. 1995. Pp. 841–850.
5. *Lin, Z.* Linear controller for an inverted pendulum having restricted travel: A high-and-low approach / Z. Lin, A. Saberi, M. Gutmann and Y. A. Shamash // *Automatica*. 1996. Pp. 933–937.
6. *Fang, J.* The LQR Controller Design of Two-Wheeled Self-Balancing Robot based on the Particle Swarm Optimization Algorithm // *Math.Problems Eng.* 2014. Art. no 729095.

*Yu. L. Karavaev*, CSc in physics and mathematics, associate professor

E-mail: karavaev\_yury@istu.ru

*S. I. Lekontsev*, master student

E-mail: stas.lekontsev@ya.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Development of a Stabilization and Motion Control System for a Mobile Two-Wheeled Balancing Robot**

*The existing automatic control systems, which are used in the development of balancing robots, are considered. The developed system of stabilization and motion control of a two-wheeled balancing robot, which is a combination of linear-quadratic regulator and PD-regulator, is proposed.*

**Keywords:** non-linear system, mobile robot, balancing robot, linear quadratic regulator, PD controller.

УДК 004.77.771

*К. С. Мыльников, Ю. А. Фоминых, С. А. Струков, студенты*

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

E-mail: kra\_dept@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Удаленный доступ к физическому эксперименту**

*В статье приводится исследование способов обеспечить удаленный доступ к проведению какого-либо физического эксперимента, так как зачастую невозможно, к примеру, студенту получить доступ к лабораторной работе из-за расположения лабораторного оборудования далеко от студента. Таким образом, нужно установить какую-либо связь между клиентом (студент) и сервером (лабораторный стенд), сохраняя возможность управления сервером со стороны клиента.*

**Ключевые слова:** LabVIEW, NI ELVIS, TeamViewer, сервер, клиент, удаленный доступ.

#### **Введение**

В случае преподавания технических и естественнонаучных дисциплин, овладение которыми подразумевает проведение лабораторных работ с реальным оборудованием, дистанционный способ преподавания становится затруднительным [1].

#### **Постановка задачи**

Основная задача состоит в том, чтобы обеспечить связь между студентом и лабораторной установкой при физической разнесенности оных. Основным способом является связывание компьютера студента и компьютера с подключенной лабораторной установкой через сеть.

Если описывать передачу данных через сеть, можно выделить следующие понятия.

Сетью называют связь между двумя или более какими-либо устройствами, подразумевающую возможность передачи каких-либо данных между этими устройствами. Соответственно, локальными сетями называют сети, которые соединяют только определенные устройства, в то время как к глобальным сетям (из широко известных можно назвать только две – World Wide Web и ее аналог в Китае) относятся сети, к которым может подключиться фактически любое устройство при наличии необходимого программного и аппаратного обеспечения.

Информация хранится на устройствах, подключенных к сети. Какие-то устройства эту информацию предоставляют, а какие-то – считывают. World Wide Web целиком состоит из предоставляемой устройствами информации, а именно – web-страниц, которые написаны на языке разметки HTML (HyperText Markup Language), просматриваемых при помощи веб-браузеров.

Устройство, предоставляющее информацию, называется «сервер». Устройство, информацию считывающее, называется «клиент». Эти термины применимы как для глобальных, так и для локальных сетей.

Структуру сети (связи между клиентом и сервером) можно представить на рис 1.

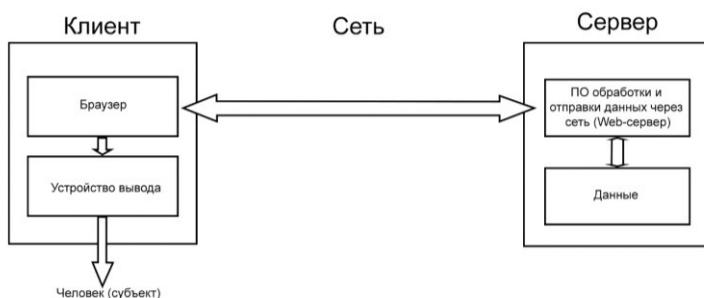


Рис. 1. Устройство передачи данных в сети

В случае с удаленным доступом к физическому эксперименту роль клиента выполняет компьютер студента, взаимодействующего с интерфейсом ПО, выполняющего взаимодействие с лабораторной установкой, а роль сервера выполняет, собственно, компьютер с установленным на него соответствующим программным обеспечением и с физически подключенной к нему лабораторной установкой.

Задача заключается в том, чтобы все изменения, производимые с компьютером-сервером, отображались на компьютере-клиенте, и наоборот – действия, производимые студентом (клиентом) в интерфейсе ПО, производились и на компьютере-сервере. Для этого требуется разработать дополнительное программное обеспечение.

### Описание эксперимента

Рассматриваются три возможных готовых решения данной задачи. На основе этих решений будут сформулированы требования к программному обеспечению, решающие поставленную задачу.

В качестве оборудования рассматриваем лабораторную станцию NI ELVIS с подключенным к ней лабораторным макетом. Сама станция в свою очередь подключена к ПК, на котором установлено ПО LabVIEW с соответствующими VI и имеется доступ к сети Интернет [2].

Для того чтобы понимать общие принципы работы LabVIEW, требуется ввести понятие «виртуальный инструмент» (англ. Virtual Instrument, VI). Это система обработки информации (электрических сигналов), смоделированная программным образом. Именно для создания таких систем разработано ПО LabView.

### 1. Skype.

ПО Skype от компании Microsoft поставляется вместе с операционной системой Windows 10. Также Skype можно установить не только на ПК, но и на смартфон/планшет.

В возможности Skype (смотри описание продукта на сайте [www.skype.com/ru/](http://www.skype.com/ru/)) входит передача через интернет следующей информации (как в сторону «клиента», так и в сторону «сервера»):

- звука с микрофона;
- изображения, захватываемого с экрана компьютера;
- изображения, захватываемого веб-камерой.

Таким образом, используя Skype, можно обеспечить полноценное дистанционное занятие, состоящее из лекции или упражнения (в нашем случае – лабораторной работы), проводимых преподавателем, в реальном времени взаимодействующим со студентами, и трансляции с экрана компьютера, подключенного к лабораторной установке.

Существенным недостатком Skype является то, что студент не может самостоятельно управлять лабораторной установкой.

### 2. LabVIEW Web server.

В самой программе LabVIEW встроен инструмент под названием Web server, который позволяет транслировать изображение рабочей области интерфейса VI в реальном времени по локальной и глобальной сети и отображать ее в браузере клиентского компьютера. При этом возможны два режима: простого отображения интерфейса и удаленного управления им. На рис. 2 и 3 изображена работа инструмента Web server.

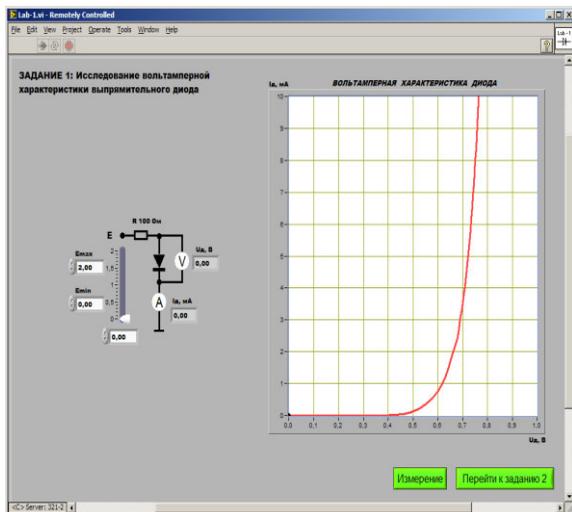


Рис. 2. Интерфейс VI лабораторной работы в среде LabVIEW

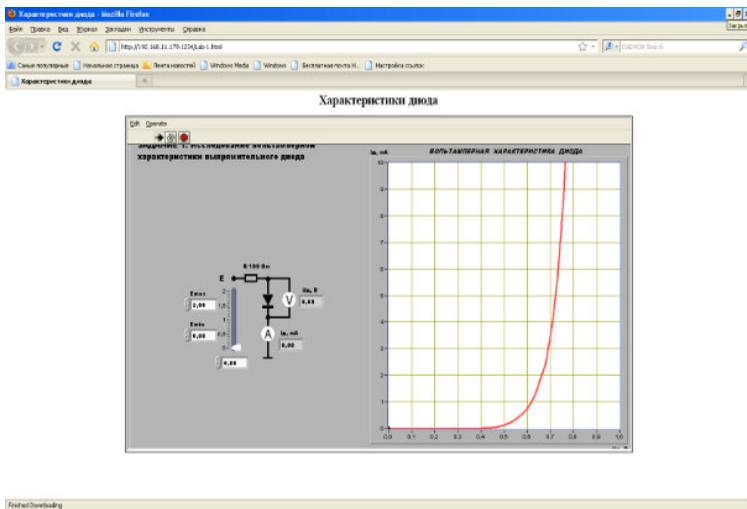


Рис. 3. Удаленное изображение интерфейса VI в интернет-браузере

На рис. 3 изображен удаленный доступ встроенными средствами LabVIEW. В данном случае передача данных ведется через локальную сеть, что создает трудности при больших расстояниях между клиентом и сервером.

Достоинством данного решения является его универсальность и удобство для пользователя, которому нет необходимости устанавливать LabVIEW на своем ПК, а достаточно лишь иметь доступ в интернет и интернет-браузер. Относительный недостаток – это необходимость квалифицированного обеспечения программной и аппаратной составляющих со стороны сервера. А именно – для обеспечения доступа нужно перенести html-страницу из локальной сети в открытый доступ, в глобальную сеть Интернет, для чего, собственно, и нужен статический IP-адрес, так как при подключении через локальную сеть IP-адрес сервера формируется в пределах локальной сети, и такой IP-адрес непригоден для использования в сети Интернет. При подключении сервера к сети Интернет без использования статического IP-адреса его IP-адрес с каждым подключением меняется (что называется динамическим IP-адресом) и, соответственно, невозможно обеспечить постоянное соединение клиента с устройством-сервером.

### 3. TeamViewer.

Это удобная в использовании программа для получения удаленного доступа к компьютерам в обход брандмауэров, заблокированных портов, а также NAT-маршрутизации локальных IP-адресов. Для подключения к серверу требуется только автоматически генерируемый логин и пароль. В возможности TeamViewer также входит передача звука с микрофона как в сторону клиента, так и в сторону сервера.

На рис. 4 показана работа данной программы.

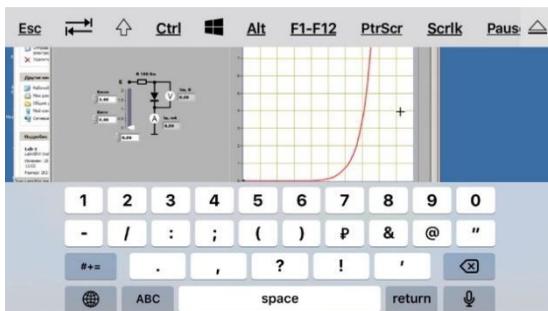


Рис. 4. Экран смартфона для удаленного управления ПК

Достоинство решения – простота, гораздо большая, чем в первом случае. А именно – достаточно просто установить ПО на ПК-сервер и ПК-клиент (или другое устройство-клиент), имеющие доступ в интернет, и сразу предоставляется возможность непосредственного управления устройством-сервером (смотри описание продукта на сайте [www.teamviewer.com](http://www.teamviewer.com)). Причем программа TeamViewer является (условно) бесплатной. Недостаток – собственно необходимость установки TeamViewer на пользовательское устройство. Также существенным недостатком TeamViewer является то, что удаленное управление через TeamViewer дает клиенту (студенту) полный доступ к операционной системе сервера, что ставит под угрозу безопасность данных, хранящихся на сервере. И, к сожалению, сервером можно управлять одновременно только с одного устройства.

### Результаты и их обсуждение

В таблице перечислены преимущества и недостатки каждого исследованного метода предоставления удаленного доступа студенту.

#### Преимущества и недостатки методов предоставления удаленного доступа к физическому эксперименту

| Номер способа | Название способа   | Преимущества способа   | Недостатки способа   |
|---------------|--------------------|--|--|
| 1             | Skype              | Реализация полноценного удаленного занятия, состоящего из лабораторной работы, проводимой преподавателем, в реальном времени взаимодействующим со студентами, и трансляции с экрана компьютера, подключенного к лабораторной установке.<br>Доступность как для ПК, так и для других устройств (смартфонов и планшетов) | Невозможность непосредственно управлять лабораторной установкой  |
| 2             | LabVIEW Web server | Клиенту достаточно лишь иметь доступ в интернет / к локальной сети и установленный интернет-браузер для управления лабораторной установкой   | Необходимость использования статического ip-адреса для обеспечения доступа дальше, чем в пределах локальной сети |

Окончание табл. 1

| Номер способа | Название способа | Преимущества способа  | Недостатки способа   |
|---------------|------------------|---|--|
| 3             | TeamViewer       | Программа является (условно) бесплатной.<br>Для удаленного управления достаточно установить ПО на компьютер-клиент и компьютер-сервер.<br>Есть возможность удаленной передачи звука с микрофона | Возможность полного доступа к операционной системе сервера<br>Необходимость устанавливать программу на компьютер-клиент;<br>Возможность управлять сервером только с одного устройства одновременно |

### Выводы

Из проведенных экспериментов можно заключить, что Skype является оптимальным вариантом для проведения дистанционных лекций, так как связывает студента и преподавателя, а также предоставляет возможность трансляции изображения с экрана, но не подходит для проведения дистанционных лабораторных работ, так как не дает студенту непосредственный доступ к лабораторной установке. TeamViewer же, из-за того что дает полный доступ к операционной системе сервера, больше подходит для удаленной отладки работы системы (настройки работы разного программного обеспечения), нежели конкретно для обеспечения удаленного доступа к физическому эксперименту. Встроенный в LabVIEW инструмент LabVIEW Web Server больше подходит для обеспечения удаленного доступа студентам, не имеющим опыта в отладке, но требует установки статического IP-адреса, что является трудоемкой процедурой.

Таким образом, взяв достоинства рассмотренных выше программ и откинув их недостатки, сформируются следующие требования к ПО для решения задачи удаленного доступа к физическому эксперименту:

1. Удобный интерфейс (понятный более чем для 75 процентов людей, в первый раз пользующихся ПО, с условием, что они не ознакомились с инструкцией к нему).
2. Установка ПО по принципу «нажать, подтвердить установку, запустить и пользоваться».
3. Универсальность установки (ПО возможно установить как на ПК, так и на смартфон/планшет).
4. Возможность управления лабораторной установкой с нескольких устройств (данная возможность реализована инструментом LabVIEW Web Server).

5. Защита передаваемых с «сервера» на «клиент» данных (отсутствие возможности «перехвата данных». Как вариант исполнения защиты – использование уникального идентификатора (логина и пароля) ПО сервера).

6. Предоставление доступа к управлению лабораторной установкой, но не к операционной системе сервера.

Ни одно из трех рассмотренных готовых решений не подходит под эти требования: LabView Web Server, не подходит под пункты 1, 5; TeamViewer не подходит по пунктам 4 и 6; Skype не подходит под пункты 4, 6.

### Список литературы

1. Организация и методика проведения лабораторных работ при дистанционном автоматизированном обучении в режиме реальных измерений по техническим дисциплинам / В. А. Глушков, А. В. Гаврилов, К. А. Зорин, Т. А. Шумилова, Д. С. Яшина // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. II Всерос. молод. науч. конф. (Тамбов, 4–5 мая 2017 г.). Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. С. 16–17.

2. Батоврин, В. К. LabVIEW: Практикум по аналоговой и цифровой электронике: лабораторный практикум / В. К. Батоврин, А. С. Бессонов, В. В. Мошкин. М., 2007. 132 с.

3. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ДМК Пресс, 2011. 904 с.

4. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW / под ред. П. А. Бутырина. М. : ДМК Пресс. 265 с.

*K. S. Mylnikov, Y. A. Fominykh, S. A. Strukov, students*  
*V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor*  
E-mail: kra\_dept@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Remote Access to a Physical Experiment

*In this article is given a research on a couple of ways to provide a remote access to some kind of physical experiment, because we cannot always get to physical stand in means of location. Therefore, we need to somehow connect the client (us/students) to server (physical stand), with a possibility of controlling the server from client side.*

**Keywords:** LabVIEW, NI ELVIS, TeamViewer, server, client, remote access.

---

УДК 621.315.617

*И. В. Штенников*, канд. техн. наук, доц.  
*И. С. Мезенцев, А. А. Бурмакин*, студенты

E-mail: mezenцев.igor1919@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Исследование относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь герметиков**

*Согласно ГОСТ 22372–77 проведены исследования относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь герметиков в диапазоне частот  $10^2$ – $10^6$  Гц. Величина диэлектрической проницаемости для исследованных герметиков «Экон», «HAUSER» и «MasterSil 817» составила 2,1–2,9, жидкой изоленты «Nano 4 Premium» – 1,2–1,8. С повышением частоты диэлектрические потери с величины 0,02–0,03 снижаются до 0,0005–0,002, а на частоте  $10^6$  Гц несколько возрастают до 0,002–0,008.*

**Ключевые слова:** герметик, свойства, электрическая емкость, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

#### **Введение**

Различные пропиточные лаки, заливочные массы, герметики и другие материалы широко используются для герметизации, электроизоляции и защиты активных элементов микро- и нанoeлектроники, плат СВЧ-изделий [1–3], радиоэлектронных устройств [4], элементов и узлов электрических машин, силового и энергетического электрооборудования [5–7]. С целью расширения номенклатуры подобного рода материалов по результатам исследований электрической прочности  $E_{пр}$  и удельного электрического сопротивления  $\rho_v$  и  $\rho_s$  герметиков «Экон», «HAUSER», «MasterSil 817» и жидкой изоленты «Nano 4 Premium» в работах [8–10] показана возможность их применения в качестве электроизоляционных заливочных материалов.

#### **Постановка задачи**

Наряду с исследованными свойствами важными характеристиками изоляционных материалов также являются относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  [1].

В связи с этим с целью формирования более полного представления знаний об электроизоляционных свойствах герметиков «Экон», «HAUSER», «MasterSil 817» и жидкой изоленты «Nano 4 Premium», а

также определения области их применения в производстве электротехнических изделий в работе проведены исследования диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь данных материалов.

Для диэлектрических материалов методы определения этих параметров регламентируются государственным стандартом ГОСТ 22372–77 (СТ СЭВ 3164–81 и СТ СЭВ 3166–81), который устанавливает определение относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в диапазоне частот от 15 до  $300 \cdot 10^6$  Гц и интервале температур от  $-60$  до  $+250$  °С.

### Описание эксперимента

Для проведения исследований по методике, приведенной в работах [8–10], приготовлены плоские образцы герметиков, которые имели ровную, гладкую поверхность, обладали достаточно равномерной толщиной. Измерение толщины проводилось микрометром в 5–6 точках, равномерно расположенных в области размещения измерительного электрода на образце. Разнотолщинность образцов не превышала  $\pm 0,01$  мм.

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 22372–77 на образцах производились измерения электрической емкости  $C_x$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  на частотах  $10^2$ ,  $10^3$  и  $10^6$  Гц в условиях комнатной температуры и влажности с использованием трехэлектродной измерительной системы с охраняемым цилиндрическим электродом (охраняемым кольцом) и измерителя иммитанса E7-20 (рисунки).



Общий вид трехэлектродной системы и прибора E7-20

В табл. 1 приведены параметры электродов трехэлектродной измерительной системы.

**Таблица 1. Параметры трехэлектродной системы**

|                                      |  |  |                                  |
|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|
| Диаметр измерительного электрода, мм | Площадь измерительного электрода $S_1$ , мм <sup>2</sup> | Внутренний/наружный диаметр охранного кольцевого электрода, мм | Зазор между электродами $l$ , мм |
| 25                                   | 490,874  | 29/60  | 2                                |

По результатам измерений электрической емкости  $C_x$  для исследуемого диэлектрика определялась величина относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_0}, \tag{1}$$

где  $C_x$  – измеренное значение электрической емкости;  $C_0$  – вычисленное значение электрической емкости для электродов, расположенных в вакууме по ГОСТ 22372-77, пФ:

$$C_0 = 0,0695 \frac{(d + B \cdot l)^2}{h}, \tag{2}$$

где  $d$  – диаметр измерительного электрода, см;  $l$  – зазор между охраняемым и измерительным электродами, см;  $h$  – толщина образца, см;  $B$  – поправочный коэффициент, равен 1, т. к. высота охранного электрода много больше превышала толщину исследуемых образцов герметиков.

### Результаты и их обсуждения

Результаты исследований диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  герметиков приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты исследований диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь герметиков «Экон», «HAUSER», «MasterSil 817» и жидкой изолянты «Nano 4 Premium»**

| Марка герметика             | Толщина образца $h$ , мм | Емкость $C_x$ , пФ | Относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$ | Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------|---|---|
| 1                           | 2                        | 3                  | 4   | 5   |
| Измерения на частоте 100 Гц |                          |                    |   |   |
| «MasterSil 817»             | 1,52                     | 7,5                | 2,1–2,3   | 0,02–0,03   |
|                             | 0,94                     | 12                 |   |   |
|                             | 1,59                     | 6,7                |   |   |
| «Экон» белый                | 2,4                      | 5,2                | 2,2–2,5   | 0,03  |
|                             | 1,81                     | 6,5                |   |   |
|                             | 1,93                     | 5,7                |   |   |
| «Экон» бесцветный           | 1,99                     | 6,1                | 2,3–2,5   | 0,03  |
|                             | 1,74                     | 6,7                |   |   |
|                             | 2,65                     | 4,7                |   |   |

Окончание табл. 2.

| 1                                    | 2    | 3     | 4       | 5           |
|--------------------------------------|------|-------|---------|-------------|
| «HAUSER»                             | 1,95 | 6,4   | 2,4–2,5 | 0,03        |
|                                      | 2    | 6,1   |         |             |
| Жидкая изолената<br>«Nano 4 Premium» | 0,43 | 19    | 1,2–1,6 | 0,02        |
|                                      | 0,34 | 18,4  |         |             |
|                                      | 0,47 | 17    |         |             |
| Электрокартон*                       | 0,22 | 83    | 3,6     | 0,1         |
| Измерения на частоте 1 кГц           |      |       |         |             |
| «MasterSil 817»                      | 1,52 | 7,51  | 2,1–2,3 | 0,001-0,002 |
|                                      | 0,94 | 12,03 |         |             |
|                                      | 1,59 | 6,72  |         |             |
| «Экон» белый                         | 2,4  | 5,23  | 2,2–2,5 | 0,001       |
|                                      | 1,81 | 6,52  |         |             |
|                                      | 1,93 | 5,86  |         |             |
| «Экон»<br>бесцветный                 | 1,99 | 6,13  | 2,3–2,5 | 0,001-0,002 |
|                                      | 1,74 | 6,79  |         |             |
|                                      | 2,65 | 4,75  |         |             |
| «HAUSER»                             | 1,95 | 6,47  | 2,4–2,5 | 0,001       |
|                                      | 2    | 6,02  |         |             |
| Жидкая изолената<br>«Nano 4 Premium» | 0,43 | 18,87 | 1,2–1,6 | 0,0005      |
|                                      | 0,34 | 18,46 |         |             |
|                                      | 0,47 | 17    |         |             |
| Электрокартон*                       | 0,22 | 77    | 3,3     | 0,04        |
| Измерения на частоте 1 МГц           |      |       |         |             |
| «MasterSil 817»                      | 1,52 | 8,42  | 2,4–2,5 | 0,004–0,006 |
|                                      | 0,94 | 13,26 |         |             |
|                                      | 1,59 | 7,58  |         |             |
| «Экон» белый                         | 2,4  | 5,99  | 2,5–2,8 | 0,005–0,008 |
|                                      | 1,81 | 7,36  |         |             |
|                                      | 1,93 | 6,66  |         |             |
| «Экон»<br>бесцветный                 | 1,99 | 6,95  | 2,6–2,9 | 0,006–0,008 |
|                                      | 1,74 | 7,65  |         |             |
|                                      | 2,65 | 5,47  |         |             |
| «HAUSER»                             | 1,95 | 7,3   | 2,6–2,8 | 0,005–0,006 |
|                                      | 2,0  | 6,51  |         |             |
| Жидкая изолената<br>«Nano 4 Premium» | 0,43 | 20,67 | 1,4–1,8 | 0,002–0,003 |
|                                      | 0,34 | 20,21 |         |             |
|                                      | 0,47 | 18,65 |         |             |
| Электрокартон*                       | 0,22 | 81,3  | 3,5     | 0,047       |

\* Для справки

Значения диэлектрической проницаемости, исследованных герметиков «Экон», «HAUSER» и «MasterSil 817» находятся в пределах 2,1–2,9, а для жидкой изолянт «Nano 4 Premium» – в пределах 1,2–1,8. Ее величина не зависит от частоты и по своим значениям соответствует свойствам неполярных и слабополярных диэлектриков [5].

Результаты исследования тангенса угла диэлектрических потерь с увеличением частоты электрического поля согласуются с характерными закономерностями изменения диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах [5]. На низкой частоте 100 Гц для исследованных материалов  $\text{tg}\delta$  составляет 0,02–0,03. С повышением частоты до 1 кГц его значение уменьшается в 15–30 раз для герметиков и в 40 раз для изолянт «Nano 4 Premium». При частоте 1 МГц диэлектрические потери несколько возрастают, примерно в 4–6 раз.

Уровень диэлектрических потерь исследованных герметиков не хуже многих изоляционных материалов, применяемых в производстве микросистемных устройств [2, 3] и электротехнических изделий (табл. 3). Их значения  $\text{tg}\delta$  не превышают величины диэлектрических потерь бакелита, текстолита, гетинакса. Соответствуют значениям  $\text{tg}\delta$  сухой бумаги, электрокартона, поливинилхлорида и уступают лакам, эластомеру ДС R-4-3117, ЛАКу ЭКТ, стеклу, фторопласту-4 (табл. 3).

**Таблица 3. Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь исследованных герметиков и некоторых диэлектриков**

| Материал                               | Диэлектрическая проницаемость | Тангенс угла диэлектрических потерь/частота, $\text{tg}\delta/f$ |
|--|-------------------------------|--|
| <b>Жидкая изолянт «Nano 4 Premium»</b> | <b>1,5–1,6</b>                | <b>0,02/100</b>  |
| Фторопласт-4*                          | 1,9–2,2                       | 0,0002–0,0003/50   |
| Бумага сухая*                          | 2,0–2,5                       | 0,02/50  |
| Масло трансформаторное*                | 2,2–2,5                       | 0,002/50   |
| <b>«MasterSil 817»</b>                 | <b>2,2–2,5</b>                | <b>0,03/100</b>  |
| <b>«Экон» белый</b>                    | <b>2,3–2,7</b>                | <b>0,03/100</b>  |
| <b>«Экон» бесцветный</b>               | <b>2,4–2,7</b>                | <b>0,03/100</b>  |
| <b>«HAUSER»</b>                        | <b>2,4–2,7</b>                | <b>0,03/100</b>  |
| Лаки*                                  | 2,5–4                         | 0,001–0,01/50  |
| Эластомер ДС R-4-3117 [2]              | 2,7                           | 0,001  |
| ЛАК ЭКТ [2, 3]                         | 3,0–3,5                       | 0,001–0,0014   |
| Поливинилхлорид*                       | 3,1–3,4                       | 0,015–0,018/10 <sup>6</sup>                                      |
| Электрокартон*                         | 3–5                           | 0,02/50  |
| Бакелит*                               | 4–4,6                         | 0,05–0,12/50   |
| Текстолит*                             | 5–7                           | 0,06–0,19/50   |
| Стекло*                                | 5,3–7,5                       | 0,006–0,010/50   |
| Гетинакс*                              | 6–8                           | 0,12–0,18/50   |

\* Данные из источников: Физические свойства диэлектриков [Электронный ресурс]. URL: <https://pomegerim.ru/electrotehnickeskie-materialy/dielektriki.php> (дата обращения: 27.03.2019); Физические параметры диэлектрических материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://sensorse.com/page57.html> (дата обращения: 27.03.2019); Относительная диэлектрическая проницаемость [Электронный ресурс]. URL: <http://weldworld.ru/theory/summary/otnositelnaya-dielektricheskaya-pronicaemost.html> (дата обращения: 26.06.2019); Тангенс угла диэлектрических потерь [Электронный ресурс]. URL: <http://weldworld.ru/theory/summary/tangens-ugla-dielektricheskikh-poter.html> (дата обращения: 26.06.2019).

Таким образом, ввиду малых значений диэлектрической проницаемости и невысокого уровня диэлектрических потерь исследованных материалов герметики марок «Экон», «HAUSER», «MasterSil 817» и жидкая изолента «Nano 4 Premium» могут использоваться в качестве изоляционных материалов, работающих в области низких частот.

### Заключение

Проведенные исследования диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь позволили расширить знания об электроизоляционных свойствах герметиков «Экон», «HAUSER», «MasterSil 817» и жидкой изолянты «Nano 4 Premium» и на основе результатов определить область их применения в производстве электротехнических изделий в качестве изоляционных материалов, работающих на низких частотах.

### Список литературы

1. Чухланов, В. Ю. Диэлектрические свойства герметизирующей композиции на основе эпоксидиановой смолы, модифицированной полиметилфенилсилоксаном, в сантиметровом СВЧ-диапазоне / В. Ю. Чухланов, О. Г. Селиванов // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 3. С. 6–10.
2. Неёлова, О. В. Защитные покрытия на основе кремнийорганических лестничных блок-сополимеров, применяемые в микроэлектронике / О. В. Неёлова, Р. А. Газаева, Л. Б. Коблова // Фундаментальные исследования. 2016. № 2. С. 76–80.
3. Коблова, Л. Б. Полиорганосилоксановые покрытия с повышенной твердостью и эластичностью, предназначенные для защиты изделий электронной техники // Фундаментальные исследования. 2017. № 12. С. 296–302.
4. Астлюхина, А. С. Термостойкий герметик с повышенными диэлектрическими характеристиками на основе полиорганосилоксана // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 4-4. С. 11–14.
5. Богородицкий, Н. П. Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. Л. : Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
6. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений / И. Д. Краев, О. В. Попков, Е. М. Шульдешов, А. Е. Сорокин, Г. Ю. Юрков // Труды ВИАМ.

М. : Изд-во ВИАМ, 2017. № 12 (60). С. 48–62. – DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5.

7. *Барановский, Н. К.* Использование полимерных электроизоляционных материалов в электроснабжении / Н. К. Барановский, С. В. Романов // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения : сб. материалов ЛШ Международ. студ. науч.-практ. конф. (29 марта 2019 г.). Тюмень : Изд-во Государственного аграрного университета Северного Зауралья, 2019. С. 776–780.

8. *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.

9. *Штенников, И. В.* Методика приготовления плоских образцов из герметиков и исследование их удельного электрического сопротивления / И. В. Штенников, Д. А. Ложкин, В. И. Черешев // Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIV Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.). Ижевск : Изд-во ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. С. 91–96.

10. *Ложкин, Д. А.* Разработка методики приготовления плоских образцов жидкой изоляцией «Nano 4 Premium» и исследование их удельного электрического сопротивления / Д. А. Ложкин, И. В. Штенников // Молодежь и научно-технический прогресс : сб. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. (18 апр. 2019 г.). Губкин ; Старый Оскол : Ассистент плюс, 2018. Т. 1. С. 67–70.

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

*I. S. Mezentsev, A. A. Burmakin*, students

E-mail: mezenczev.igor1919@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **The Study of the Relative Dielectric Constant and Tangent of Dielectric Loss Angle of Sealants**

*According to GOST 22372-77, studies of the relative permittivity and the tangent of the dielectric loss angle of sealants in the frequency range  $10^2$ – $10^6$  Hz were carried out. The dielectric constant for the studied Econ, HAUSER, and MasterSil 817 sealants was 2.1–2.9, and for the Nano 4 Premium liquid insulating tape it was 1.2–1.8. With increasing frequency, the dielectric loss from 0.02–0.03 decreases to 0.0005–0.002, and slightly increases to a frequency of  $10^6$  Hz to 0.002–0.008.*

**Keywords:** sealant, properties, electrical capacitance, dielectric constant, dielectric loss tangent.

УДК 631.22 :628.9

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

*И. М. Новоселов*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: igorst58@mail.ru, 9635496568@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Пути решения проблемы обеспечения равномерности освещения горизонтальных поверхностей на разных высотах**

*Рассмотрены современные проблемы обеспечения равномерности освещенности горизонтальных поверхностей, расположенных на разных высотах от общего источника света. В частности, рассматривается способ обеспечения равномерной освещенности кормушек для кур-несушек промышленного стада при помощи оригинальной конструкции светильника. Эффективность предложенной конструкции демонстрируется при помощи программного комплекса Dialux.*

**Ключевые слова:** системы освещения, светодиодные светильники, освещенность, кривая сила света, моделирование, птичник, клеточная батарея.

### **Введение**

Одним из основных параметров оценки качества системы освещения является ее равномерность. При освещении горизонтальных плоскостей с этим эффективно справляются уже известные способы расчета, например: метод коэффициента использования светового потока, точечный способ расчета освещенностей и расчет способом удельной мощности [1].

Для освещения одним источником света множества горизонтальных плоскостей, находящихся на разной высоте, такой способ вызывает затруднения. Рассмотрим этот вопрос подробнее на примере освещения кормушек клеточных батарей для содержания кур-несушек промышленного стада.

### **Сведения из теории**

Птицеводство – одна из наиболее динамично развивающихся отраслей сельского хозяйства. С 2010 г. по 2018 г. объем выработки мяса птицы вырос на 71 %<sup>1</sup>, а производство яиц выросло на 10,6 %<sup>2</sup>.

---

© Штенников И. В., Новоселов И. М., 2019

<sup>1</sup> Сайт службы Росстат. URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/import-zam/2-2.xls](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/import-zam/2-2.xls)

<sup>2</sup> Сайт службы Росстат. URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/doc\\_2018/bul\\_dr/sx/PROD\\_-2018.rar](http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/bul_dr/sx/PROD_-2018.rar)

При этом до 2011 г. в Удмуртии освещение кормушек кур-несушек промышленного стада в 98,5 % случаев производилось преимущественно лампами накаливания [2]. Основные причины:

1. Коэффициент мерцания светового потока ламп накаливания не выше 0,06 о. е. [3].

2. Цветовая температура ламп накаливания 2700–3500 К – наиболее благотворно влияет на яйценоскость [4].

3. Простой и доступный способ регулировки освещенности на кормушке. Для этих целей широко используются тиристорные устройства регулирования. Люминесцентные источники света долгое время не имели возможности плавного регулирования освещенности от 0 до 100 % без влияния на пульсацию светового потока [5, 6].

4. Системы освещения кормушек кур-несушек потребляют в 3–5 раз меньше электроэнергии, чем другие системы освещения, например, помещений для крупного рогатого скота. Причина этому – низкие нормы освещенности кормушек: для кур-несушек оптимальной освещенностью является 10–15 Лк. Ее необходимо поддерживать 90 % времени освещения этих птиц<sup>3</sup>, в то время как средние нормы освещенности в прочих помещениях для содержания животных составляют в среднем 40–80 Лк<sup>4</sup>.

Текущее состояние этой отрасли можно назвать как «массовый переход на светодиодные системы освещения» [5, 6]. Уже имеются научные работы, доказывающие превосходство светодиодных светильников над светильниками с лампами накаливания, которые до сих пор предпочитают использовать из-за настойчивости ветеринаров на птицефабриках [7]. Применение светодиодных светильников не только снижает потребление электроэнергии, но и улучшает качественные показатели яйценоскости и самого яйца [8].

Важно понимать, что если после модернизации системы освещения потребление электроэнергии снизится в 4 раза, но яйценоскость при этом снизится всего на 1 %, то это приведет к финансовому убытку [2].

Поэтому разработка новых устройств для освещения промышленного стада кур-несушек должна преследовать следующие задачи:

1) поддержание оптимального электромагнитного спектра излучения и низкого коэффициента мерцания;

2) возможность регулирования освещенности в полном диапазоне от 0 до 100 %;

3) поддержание оптимальной освещенности кормушек на всех ярусах (от 10 до 50 Лк в зависимости от сезона);

<sup>3</sup> Нормы содержания животных НТП-АПК 1.10.05.001-01

<sup>4</sup> Стандарты содержания животных ОСН-АПК 2.10.24.001-04

- 4) решение задачи теплоотвода и запаса мощности для поддержания нужной освещенности после начала деградации светодиода;
- 5) выполнение класса пылевлагозащиты на уровне не ниже IP65;
- 6) поддержание параметра равномерности освещенности на всех кормушках в пределах от 1 до 1,3.

Последнюю задачу множество авторов предлагают решать различными путями. Самое логичное – расположение источника света непосредственно в клетке, над кормушкой [9, 10]. Такое решение полностью решает проблему создания заданной равномерности. Но при этом количество источников света и токопроводящих частей увеличивается в 6–12 раз. Соответственно увеличиваются и затраты труда на обслуживание такой системы.

Проход между клеточными батареями все равно необходимо освещать. Рациональность такой системы освещения – вопрос открытый. Если равномерную освещенность кормушек можно создать, не «влезая» в клетку к птице, то это необходимо обязательно использовать.

Популярное решение – это пространственное расположение светодиодов и применение матовых колб. Подобное решение предлагалось ранее авторами статьи.

Применение вторичной оптики (фокусирующих линз и рефлекторов) также возможно. Но изменение компоновки птичника и клеточных батарей приведет к тому, что придется менять вторичную оптику. Поэтому необходимо такое решение, которое позволит использовать один светильник без изменения его конструкции, но с возможностью настройки под новые габариты батарей и птичника.

### **Описание эксперимента**

Для этих целей авторами патента [11] разработана модель «Светодиодный осветительный прибор» (рис. 1).

Поддержание необходимой освещенности достигалось наличием линеек светодиодов 6, расположенных под разными углами на подложке 5, которая, в свою очередь, расположена на основании 3 определенной геометрической формы и имеет радиаторные элементы 4 для охлаждения. Диммер 7 расположен на креплении к корпусу 1, который содержит крепежи для оптически прозрачного стекла 2, обеспечивающего герметичность. Кривая сила света светодиодов в приборе имела узконаправленную форму.

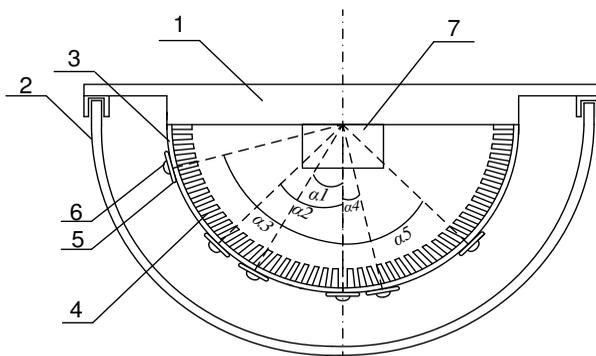


Рис. 1. Светодиодный осветительный прибор:

1 – короб, 2 – оптически прозрачное стекло, 3 – основание, 4 – радиаторные элементы, 5 – подложка, 6 – линейка светодиодов, 7 – диммер

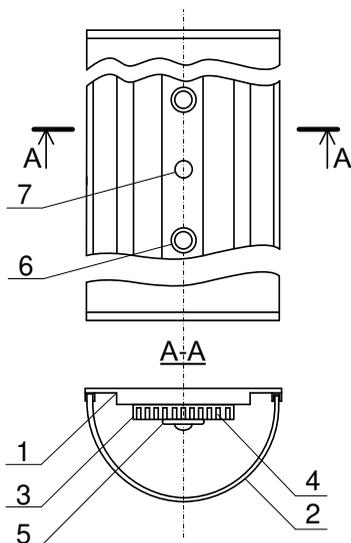
Однако такой светильник требовал точной настройки расположения линеек светодиодов, а также подбора их типа. Ширина прохода между клеточными батареями в птичнике может варьироваться от 0,5 до 2,5 м. Количество ярусов может быть от двух до шести. В этом случае для каждой комбинации «ширина прохода – число ярусов» необходимо создавать новый светильник с другим расположением линеек светодиодов, а также их типов.

Появляется проблема регулирования параметров светильника на месте их эксплуатации, так как реконструкция клеточных батарей, изменение планировки птичника происходят регулярно.

Вторая проблема – учет и хранение множества типов светильников под разные клеточные батареи на птицефабрике. Установка неправильно подобранного светильника может привести к тому, что качественно будет освещен только один из ярусов клеточной батареи.

Поэтому разработана более совершенная конструкция светильника (рис. 2)

Вместо полусферического основания, которое позволяет регулировать угол наклона линеек, предлагается использовать плоское основание 3, имеющее радиаторные элементы 4, но с расположенными на нем светодиодами с разной кривой силы света (КСС) 6 и 7, которые расположены на подложке 5. Для клеточных батарей, имеющих 3–5 ярусов, достаточно использование двух типов светодиодов – с широкой и глубокой КСС. Оптически прозрачное стекло 2 прикреплено к корпусу 1.



*Рис. 2.* Предлагаемый светодиодный осветительный прибор:  
 1 – короб, 2 – оптически прозрачное стекло, 3 – основание, 4 – радиаторные элементы,  
 5 – подложка, 6 и 7 – светодиоды с разной формой КСС

При этом регулирование освещенности достигается специальной схемой подключения светодиодов к диммеру.

### Результаты и их обсуждение

Для определения эффективности предложенного варианта конструкции светильника произведено пространственное моделирование освещенности в программе Dialux. В рассматриваемом примере использована типичная 4-ярусная клеточная батарея для содержания кур-несушек. На рис. 3 показана модель распределения освещенности при использовании ламп накаливания с типичной косинусной КСС, а на рис. 4 приведено распределение освещенности при использовании предлагаемой конструкции светильника.

При системе освещения лампами накаливания требуемая освещенность (10 Лк) обеспечивается вдоль всей кормушки лишь на втором ярусе (рис. 3). На нижнем ярусе она колеблется от 5 до 7,5 Лк. На третьем и четвертом – от 5 до 20 Лк и более (рис. 3). Таким образом, коэффициент разброса освещенности на первом ярусе составляет 1,5, на втором – 1,25, на третьем – 3, на четвертом – 6 и определяется по формуле

$$K = \frac{E_{\max}}{E_{\min}}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент разброса освещенности, о. е.;  $E_{\min}$  – минимальная освещенность на поверхности, Лк;  $E_{\max}$  – максимальная освещенность на поверхности, Лк.

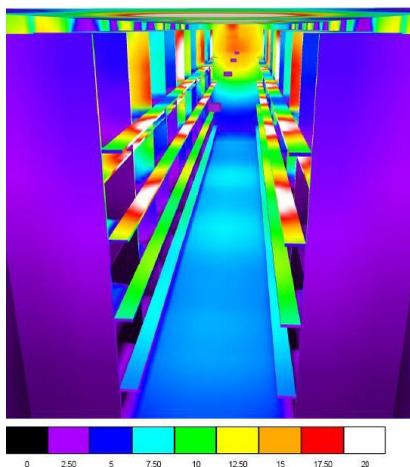


Рис. 3. Распределение освещенности 4-ярусной клеточной батареи при использовании ламп накаливания

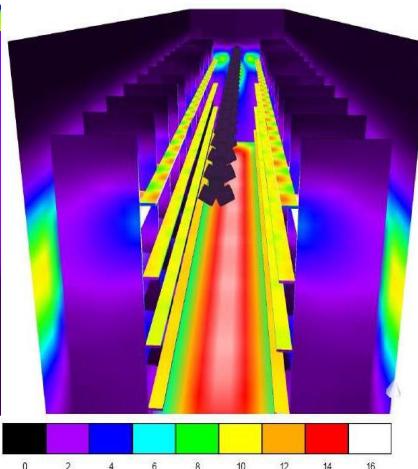


Рис. 4. Распределение освещенности при использовании предлагаемого светодиодного осветительного прибора

Предлагаемая система освещения при помощи светодиодных светильников обеспечивает требуемую освещенность вдоль всей линии кормушек на всех четырех ярусах (рис. 4). При этом коэффициент разброса освещенности находится в диапазоне от 1 до 1,3.

## Выводы

Применение предлагаемой конструкции светильника способствует повышению равномерности освещения на всех ярусах клеточной батареи без изменения прочих параметров светового климата в птичнике. Решение проблемы демонстрируется при помощи программы Dialux.

### Список литературы

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. М., 2006. 972 с.
2. *Новоселов, И. М.* Разработка и обоснование эффективности технологического светодиодного освещения птичника промышленного стада кур-несушек : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.20.02. Ижевск, 2011. 19 с.
3. *Шилов, С. М.* Современные требования, предъявляемые к системам освещения в птицеводстве. Индекс мерцания – что это? // Птицеводство. 2019. № 2. С. 35–38.
4. Продуктивность кур при светодиодном освещении с изменяемой цветовой температурой / А. Ш. Кавтарашвили, Е. Н. Новоторов, В. А. Гусев, Д. В. Гладин // Птицеводство. 2017. № 3. С. 27–29.
5. *Гладин, Д. В.* Современное светодиодное освещение – путь к повышению эффективности птицеводства // Эффективное животноводство. 2018. № 3 (142). С. 26–29.
6. *Кавтарашвили, А. Ш.* Сравнительная эффективность различных систем освещения в птицеводстве / А. Ш. Кавтарашвили, Д. В. Гладин // Птицеводство. 2016. № 4. С. 37–50.
7. *Гончарова, Л. Н.* Влияние различных источников освещения на яичную продуктивность кур-несушек // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 11 (145). С. 95–98.
8. *Вакуленко, Ю. А.* Источники освещения при клеточном содержании кур-несушек // Птицеводство. 2014. № 6. С. 12–14.
9. Светотехнические системы освещения для птицеводческих помещений / А. Кавтарашвили, А. Лямцов, В. Малышев, Я. Чванов // Птицеводство. 2013. № 4. С. 12–14.
10. *Степанчук, Г. В.* Анализ факторов, влияющих на продуктивность птицы / Г. В. Степанчук, Н. Е. Пономарева, А. О. Гаптуллина // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве : сб. тр. 77-й науч.-практ. конф. Ставрополь : АГРУС, 2013. С. 216–221.
11. Пат. № 99242 Российской Федерации. МПК H01 J 33/00. Светодиодный осветительный прибор / И. М. Новоселов, Н. П. Кочетков. Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 31.

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

*I. M. Novoselov*, CSc in engineering, associate professor

E-mail: igorst58@mail.ru, 9635496568@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Ways to Solve the Problem of Ensuring Uniform Illumination of Horizontal Surfaces at Different Heights

---

*The article considers modern problems of ensuring uniform illumination of horizontal surfaces located at different heights from a common light source. In particular, a method is considered to ensure uniform illumination of feeders for laying hens of an industrial herd using an original lamp design. The effectiveness of the proposed design is demonstrated using the Dialux software package.*

**Keywords:** lighting systems, LED lamps, illumination, light intensity curve, modeling, hen house, cell battery.

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

УДК 620.179.161

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

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

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

*С. М. Молин*, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр.

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

*Д. С. Рысев*, магистрант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### Исследование возможности обнаружения дефектов в пенополиэтилене акустическим бесконтактным методом

*В статье исследована возможность обнаружения дефектов в пенополиэтилене акустическим бесконтактным методом. Исследования выполнены на листе пенополиэтилена, в котором сымитированы искусственные дефекты типа отверстия, вмятины, включения, сквозного и несквозного порезов, имеющие различные размеры. Показана достаточная чувствительность метода для выявления различных дефектов, в том числе и малых.*

**Ключевые слова:** пенополиэтилен, акустический теневой метод, искусственные дефекты.

#### Введение

Пенополиэтилен (ГОСТ Р 56729–2015 (EN 14313:2009)) представляет собой полужесткий или эластичный теплоизоляционный материал на основе полимеров, полученных из этилена, который широко применяется во многих областях промышленности за счет своих уникальных физико-механических свойств. Пенополиэтилен обладает высокими коэффициентами шумопоглощения, виброгашения, эластичностью, ветро-ластоустойчивостью, при этом низкой теплопроводностью и сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур [1–4]. Области применения пенополиэтилена можно разделить на две группы: бытовое и

промышленное. К бытовому применению пенополиэтилена можно отнести теплоизоляцию и шумоизоляцию зданий и автомобилей [2, 5–8], производство товаров для активного отдыха, спортоваров, зимней и специальной одежды [9], использование в качестве упаковочного материала. Основное применение в промышленности – для тепловой изоляции в установках, работающих в диапазоне рабочих температур от минус 80 °С до плюс 150 °С [10], а также в особо опасных объектах, при этом нарушение сплошности листов пенополиэтилена, даже не воспринимаемое глазом, может привести к серьезным последствиям в результате нарушения теплоизоляции [11, 12]. В связи с этим возникает необходимость контроля сплошности листов из пенополиэтилена как в процессе эксплуатации, так и в процессе производства.

Для контроля сплошности пенополиэтилена могут быть использованы тепловые, оптические, термографические, радиационные методы, при этом они имеют ряд недостатков, например необходимость обеспечения особых температурных условий измерения, невозможность контроля в процессе производства и др. [11–14]. В связи с этим возникает необходимость разработки новых методик и устройств для их реализации, позволяющих обнаруживать различные дефекты в листах из пенополиэтилена, применяемого в промышленных установках и других объектах.

В работе рассмотрена возможность использования для обнаружения дефектов в листах пенополиэтилена бесконтактного акустического метода, работающего в высокочастотной области звукового диапазона.

### **Описание экспериментальной установки**

Исследование возможности обнаружения дефектов в пенополиэтилене осуществляется с помощью экспериментальной установки, реализующей акустический теневой бесконтактный метод контроля.

Суть акустического теневого метода (ГОСТ 23829–85) состоит в анализе изменения амплитуды прошедшей волны, обусловленного наличием дефекта [14, 15]. Бесконтактность метода позволяет излучать акустическую волну в объект контроля сквозь слой воздуха, что не требует использования контактной жидкости, которая ввиду пористости пенополиэтилена может проникать внутрь и искажать результаты контроля. Экспериментальная установка, реализующая данный метод, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для проведения контроля листов пенополиэтилена

Генератор зондирующих импульсов подает электрический сигнал на излучающий преобразователь (диаметр пьезопластины 40 мм, рабочая частота 11 кГц), под действием которого возбуждается акустическая волна. Излученная акустическая волна проходит через лист пенополиэтилена и поступает на аналогичный излучающему приемный преобразователь, далее сигнал усиливается и оцифровывается, значение амплитуды зарегистрированного сигнала отображается на компьютере со специализированным программным обеспечением. При этом обязательным условием проведения контроля является соосность излучающего и приемного преобразователей.

Основным информативным параметром теневого метода является амплитудный параметр прошедшего сквозь лист из пенополиэтилена импульса, величина которого зависит от плотности листа и наличия дефектов. Увеличение плотности или толщины листа ведет к снижению амплитудного параметра прошедшего сигнала в результате увеличения влияния затухания (поглощения, рассеивания) акустической волны. Данная закономерность лежит в основе обнаружения дефектов листов пенополиэтилена, при этом степень изменения амплитудного параметра может лежать в основе критериев браковки листов и оценки допустимости или недопустимости того или иного дефекта.

### Результаты и их обсуждение

Исследования выполнены на листах пенополиэтилена плотностью  $50 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 5 мм, на которых были созданы искусственные дефекты различных размеров, такие как отверстие, вмятина круглой формы, порезы сквозной и несквозной глубиной 2 мм, включение.

В качестве первого искусственного дефекта исследованы отверстия диаметром 0,5–40 мм. Измерение амплитудного параметра прошедшего

сигнала осуществлялось при расположении отверстия строго по центру преобразователей, а также в бездефектной области (значение диаметра отверстия 0). Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала через участок листа пенополиэтилена с отверстием различного диаметра представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Из графика (рис. 2) видно, что с увеличением диаметра отверстия наблюдается увеличение амплитудного параметра прошедшего сигнала. При этом кривую можно условно разделить на два участка. Первый участок кривой является нелинейным и находится в диапазоне диаметров отверстия от 0 до 10 мм, здесь наблюдается изменение амплитудного параметра прошедшего сигнала при изменении диаметра искусственного дефекта. При этом наличие отверстия диаметром 0,5 мм уже приводит к увеличению амплитудного параметра прошедшего сквозь лист пенополиэтилена на 20 относительных единиц, что позволяет уверенно обнаруживать дефекты подобного типа даже малого размера. При увеличении размера отверстия наблюдается дальнейший рост амплитуды прошедшего сигнала.

**Таблица 1. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала листа с искусственными дефектами – отверстиями различного диаметра**

| Диаметр отверстия, мм | Значение амплитудного параметра прошедшего сигнала, отн. ед. |
|-----------------------|--|
| 0 (без дефекта)       | 310  |
| 0,5                   | 330  |
| 0,8                   | 342  |
| 1,0                   | 354  |
| 1,5                   | 412  |
| 2,0                   | 431  |
| 5,0                   | 679  |
| 10,0                  | 998  |
| 20,0                  | 1023   |
| 40,0                  | 1023   |

На втором участке кривой (при диаметре отверстия более 10 мм) амплитуда прошедшего сигнала остается постоянной, т. к. размер отверстия при таких диаметрах не оказывает влияния на него и акустическая волна беспрепятственно проходит сквозь лист.

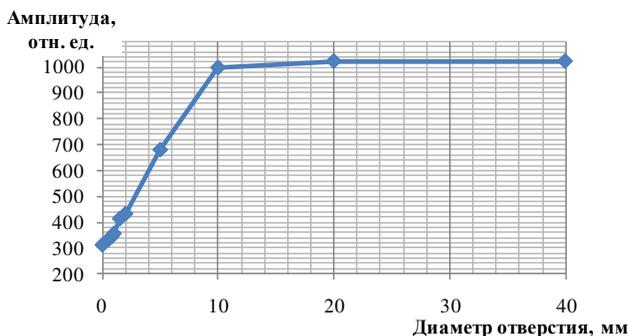


Рис. 2. Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от диаметра искусственного дефекта – отверстия

Вторым искусственным дефектом, возможность обнаружения которого была исследована, является вмятина круглой формы различного диаметра на листе пенополиэтилена. Вмятина формировалась путем вдавливания металлического цилиндра различного диаметра при одинаковой силе воздействия ( $F = 39,2$  Н). В процессе формирования вмятины наблюдается уменьшение толщины листа пенополиэтилена при сохранении прочих характеристик.

Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала через участок листа пенополиэтилена с вмятиной круглой формы различного диаметра представлены в табл. 2 и на рис. 3.

**Таблица 2. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала листа с искусственными дефектами – вмятинами круглой формы различного диаметра**

| Диаметр вмятины, мм | Значение амплитудного параметра прошедшего сигнала, отн. ед. |
|---------------------|--|
| 0 (без дефекта)     | 357  |
| 13                  | 421  |
| 25                  | 441  |
| 28                  | 497  |

На графике (рис. 3) наблюдается нелинейное увеличение амплитуды прошедшего сигнала, т. к. уменьшение толщины листа ведет к увеличению амплитуды. При этом рост диаметра вмятины приводит к увеличению ее влияния на величину амплитудного параметра прошедшего сигнала.

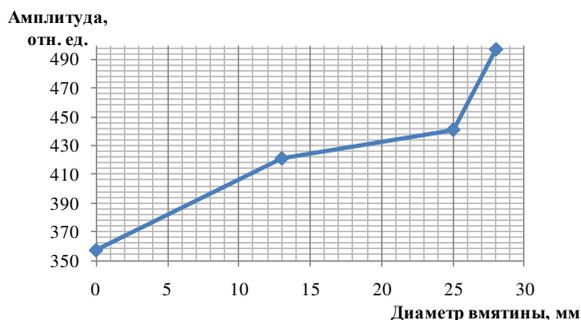


Рис. 3. Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от диаметра искусственного дефекта – вмятины круглой формы

Третьим искусственным дефектом, который был исследован, является имитация инородного включения различной толщины. Имитация включения осуществлялась путем наклеивания на лист пенополиэтилена ленты поливинилхлоридной электроизоляционной с липким слоем (ГОСТ 16214–86) толщиной 0,15 мм, 0,30 мм и 0,45 мм, толщина 0 мм соответствует бездефектному участку.

Результаты измерения амплитуды прошедшего сигнала через участок листа пенополиэтилена с включениями различной толщины представлены в табл. 3 и на рис. 4. С увеличением толщины включения наблюдается уменьшение амплитудного параметра прошедшего сигнала, т. к. толщина листа увеличивается, а плотность ленты выше (около  $140 \text{ кг/м}^3$ ), чем плотность исследуемого листа пенополиэтилена. При малых значениях толщины включения (до 0,30 мм) уменьшение амплитудного параметра прошедшего сигнала линейно, далее линейность кривой нарушается. Используемый метод позволяет уверенно обнаруживать включения в виде ленты (например, заплавленного участка поверхности у несшитого пенополиэтилена), т. к. изменение амплитудного параметра прошедшего сигнала составляет 27 отн. ед. по сравнению с бездефектным участком.

Таблица 3. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала листа с искусственными дефектами – включениями различной толщины

| Толщина включения, мм | Значение амплитудного параметра прошедшего сигнала, отн. ед. |
|-----------------------|--|
| 0 (без дефекта)       | 354  |
| 0,15                  | 327  |
| 0,30                  | 300  |
| 0,45                  | 289  |

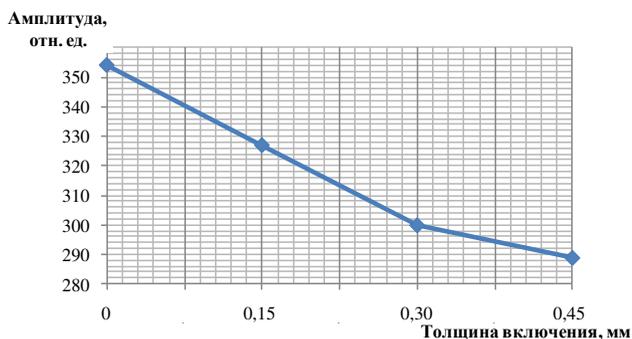


Рис. 4. Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от толщины искусственного дефекта – включения

Следующими искусственными дефектами, которые были исследованы, являются сквозные и несквозные (глубиной 2 мм) порезы различной длины (10 мм, 20 мм, 40 мм) на листе пенополиэтилена. Порез длиной 0 мм соответствует бездефектному участку листа.

Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала через участок листа пенополиэтилена со сквозными порезами различной длины представлены в табл. 4 и на рис. 5. Увеличение длины сквозного пореза ведет к росту амплитудного параметра прошедшего сигнала. Появление сквозного пореза длиной 10 мм ведет к росту амплитудного параметра прошедшего сигнала на 40 отн. ед. Далее наблюдается меньший рост амплитуды и при порезе длиной 20 мм увеличение составляет 52 отн. ед. по сравнению с бездефектным участком, при этом при длине пореза 40 мм изменение амплитуды уже составляет 121 отн. ед. Данная зависимость (рис. 5) позволяет предположить возможность обнаружения сквозных порезов даже очень маленькой длины (менее 10 мм).

Таблица 4. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала листа с искусственными дефектами – сквозными порезами различной длины

| Длина сквозного пореза, мм | Значение амплитудного параметра прошедшего сигнала, отн. ед. |
|----------------------------|--|
| 0 (без дефекта)            | 353  |
| 10                         | 393  |
| 20                         | 405  |
| 40                         | 474  |

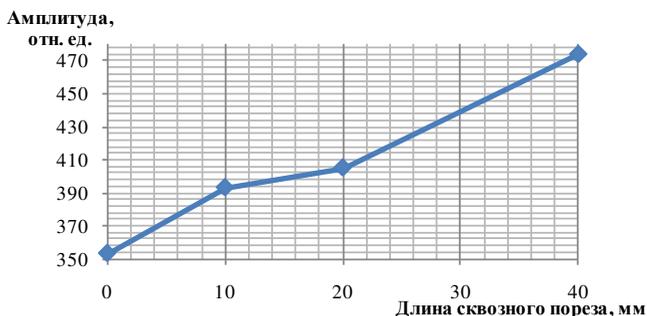


Рис. 5. Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от длины искусственного дефекта – сквозного пореза

Результаты измерения амплитуды прошедшего сигнала через участок листа пенополиэтилена с несквозными порезами глубиной 2 мм различной длины представлены в табл. 5 и на рис. 6.

Таблица 5. Результаты измерения амплитудного параметра прошедшего сигнала листа с искусственными дефектами – несквозными порезами глубиной 2 мм различной длины

| Длина несквозного пореза, мм | Значение амплитудного параметра прошедшего сигнала, отн. ед. |
|------------------------------|--|
| 0 (без дефекта)              | 334  |
| 10                           | 346  |
| 20                           | 351  |
| 40                           | 369  |

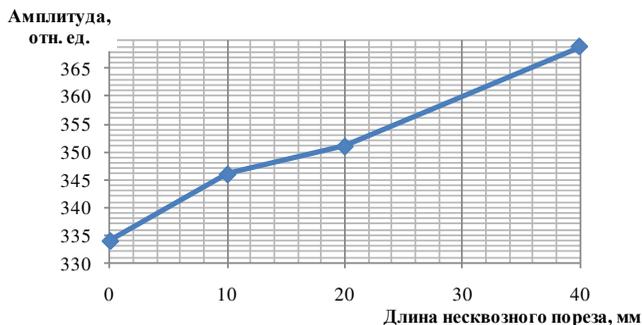


Рис. 6. Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от длины искусственного дефекта – несквозного пореза глубиной 2 мм

Зависимость амплитудного параметра прошедшего сигнала от длины несквозного пореза глубиной 2 мм носит характер аналогичный зависимости от сквозного пореза, но при меньшем изменении значения амплитуды (примерно в 4 раза), что снижает чувствительность обнаружения таких дефектов. Несмотря на это, даже для пореза длиной 10 мм чувствительность метода остается достаточной.

### **Выводы**

Таким образом, в работе показана возможность проведения контроля листов пенополиэтилена акустическим теневым бесконтактным методом, обладающим хорошей чувствительностью, позволяющей обнаруживать дефекты различных типов (отверстие, вмятина, включение, порез и т. п.) и имеющие малые размеры.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашикова» (проект №12.06.01/18МОВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий (рег. номер: 586308).*

### **Список литературы**

1. Взаимосвязь электретных свойств пенополиэтилена и коэффициента их вспенивания / И. Р. Гильманов, М. Ф. Галиханов, А. Р. Гильманова, М. А. Дымова // Вестник технологического университета. 2018. Т. 21, № 9. С. 42–45.
2. Белокуров, В. Н. Анализ эксплуатационных свойств армированных композитных материалов в бытовой технике / В. Н. Белокуров, А. И. Жаворонков, Л. А. Лукина // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 4. С. 24–31.
3. Белокуров, В. Н. Условия получения полимерных материалов с заданными деформационными показателями / В. Н. Белокуров, Л. С. Завязкина, Д. В. Шагунов // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 1. Ст. № 128TVN115.
4. Влияние минеральных наполнителей на свойства химически сшитого пенополиэтилена / А. В. Панкратов, Г. Н. Матюхина, Ю. Т. Панов, О. А. Фридман // Пластические массы. 2010. № 7. С. 32–34.
5. Системы изоляции объектов для хранения техники / К. А. Тер Закарян, Е. А. Шокодько, Е. Д. Фомина, Е. Ю. Жукова // Московский экономический журнал. 2019. № 3. С. 26.
6. Пенополиэтилен как теплоизоляция для холодного климата / А. Д. Жуков, Б. А. Ефимов, Ю. В. Сазонова, А. Ю. Жуков // Научное обозрение. 2017. № 15. С. 10–14.
7. Ткаченко, Ю. Л. О возможности применения искусственных экосистем для обеспечения жизнедеятельности человека // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 114–119.

8. Дроздова, Л. Ф. Обзор современных компрессорных установок и материалов для снижения их шума / Л. Ф. Дроздова, Е. Ю. Чеботарева, А. В. Кудяев // *Noise theory and practice*. 2018. Т. 4, № 2. С. 11–20.
9. Композиционные материалы и их применение в обувном производстве / И. Ш. Абдуллин, Р. Г. Ибрагимов, Г. Ш. Музафарова, Э. М. Саматова // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 19. С. 150–154.
10. Ковалевский, В. Тепловая изоляция для объектов трубопроводного транспорта нефти // *Технологии топливно-энергетического комплекса*. 2006. № 1. С. 58–63.
11. Перрен, А. А. Неразрушающий контроль полимерных композитных материалов в судостроении / А. А. Перрен, А. М. Баганик // *В мире неразрушающего контроля*. 2011. № 3 (53). С. 24–26.
12. Жарова, Ю. А. Обзор методов неразрушающего контроля изделий авиационной техники из полимерных композиционных материалов // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2014. № 1-1. С. 34–38.
13. Неразрушающие методы контроля содержания связующих в полимерных композитных материалах / В. И. Постнов, О. Л. Бурхан, А. Э. Рахматуллин, С.М. Качура // *Труды ВИАМ*. 2013. № 12. С. 6.
14. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 2004. 846 с.
15. Трифонова, С. И. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов / С. И. Трифонова, А. С. Генералов, М. А. Далин // *В мире неразрушающего контроля*. 2016. Т. 19, № 1. С. 31–35.

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

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

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

*S. M. Molin*, CSc in engineering, associate professor, senior researcher

Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

*D. S. Rysev*, magister student

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Research of Possibility of Defects Detection in Foam Polyethylene by Acoustic Contactless Method**

*The article investigates the possibility of detecting defects in the foam polyethylene by the acoustic contactless method. The studies were performed on a sheet of the foam polyethylene, in which artificial defects such as holes, dents, inclusions, through and non-through cuts having various sizes were simulated. Sufficient sensitivity of the method to detect various defects, including small ones, is shown.*

**Keywords:** Polyethylene foam, acoustic shadow control method, artificial defects.

УДК 615.47: 616-073

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

*А. Д. Широбокова*, студент

*Ю. С. Гуляева*, аспирант

*Т. А. Халтурина*, ст. преп.

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование влияния глубины обзора на уровень интенсивности ультразвукового излучения**

*В статье показано влияние определенных параметров ультразвукового сканера на выходное значение интенсивности ультразвукового излучения. Выполнены исследования влияния на уровень интенсивности ультразвукового излучения в В-режиме таких настроек сканера, как частота ультразвукового излучения, количество фокусов и установленная глубина обзора (RGD).*

**Ключевые слова:** интенсивность ультразвукового излучения, установленная глубина обзора, число фокусов, частота ультразвукового излучения, безопасность.

### **Введение**

Ультразвуковые (УЗ) исследования являются наиболее распространенными в медицинской диагностике, при этом актуальными являются вопросы безопасности аппаратов УЗ-диагностики, их сертификации и периодической поверки. Одним из основных параметров, определяющих безопасность УЗ-излучения, является пик-пространственная усредненная по времени интенсивность  $I_{spia}$ . Согласно ГОСТ ИЕС 61157–2013 [1], при всех режимах работы прибора для конкретной комбинации датчика и электронного блока ультразвукового прибора регламентируются максимально возможные уровни: для  $I_{ob} < 20$  мВт/см<sup>2</sup>, для  $p_- < 1$  МПа, для  $I_{spia} < 100$  мВт/см<sup>2</sup>.

Изменение врачом настроек сканера в процессе диагностики для достижения более качественной картины может вести к изменению интенсивности. Это делает проблему комплексного тестирования и сертификации ультразвукового медицинского оборудования особенно актуальной. Методы испытаний должны оценивать как безопасность, так и эффективность ультразвуковых устройств. Этот список параметров неполный. Согласно рекомендациям МЭК, описание акустических харак-

теристик ультразвукового зонда должно включать от 11 до 23 различных параметров в зависимости от типа зонда [2–6].

На сегодняшний день в России отсутствует метрологическая поверка ультразвуковых систем, в то время как зарубежные ученые уделяют большое внимание достоверности определения ультразвуковых параметров. По результатам метрологического мониторинга, эксплуатационные характеристики около трети ультразвуковых сканеров, используемых в отечественных клиниках, отличаются от тех, что указаны в технических условиях производителя [2]. Таким образом, работа по метрологическому обеспечению ультразвуковых измерений весьма актуальна.

Целью работы является исследование влияния настроек УЗ-диагностического сканера EDAN U50 на интенсивность УЗ-излучения, измеренного методом взаимности на поверхности УЗ-конвексного датчика с использованием гидрофона, откалиброванного с помощью имитатора виброскорости.

### **Методика оценки интенсивности ультразвукового медицинского оборудования точечным приемником УЗ-колебаний**

Исследуемый ультразвуковой сканер EDAN U50 – портативный бюджетный аппарат, применяемый во всех областях ультразвуковой диагностики. Сканер имеет возможность регулировки параметров визуализации, за счет чего изображение имеет более высокое качество. Также он оснащен большим количеством датчиков, что позволяет отрегулировать сканер под определенные условия работы специалиста. Технические характеристики, основные режимы и функции диагностического сканера приведены в табл. 1.

*Таблица 1. Технические характеристики, основные режимы и функции УЗ-сканера EDAN U50*

|   |  |
|---|--|
| Режимы визуализации                                     | B, B/B, 4B, B/M, M, PD, PW, CDF, THI, TSI<br>тканевая гармоника, направленный энергетический доплер, тканевой доплер, импульсно-волновой доплер и т.д.). |
| Типы датчиков   | Конвексный, линейный   |
| Рабочая частота   |  |
| – Линейный датчик                                       | 4.5/ 5.5/ 6.5/ H5.6/ H6.0 MHz  |
| – Конвексный датчик                                     | 2.5/3.5/4.5/H2.5/H2.7 MHz  |
| Глубина сканирования                                    | От 20 до 250 мм  |
| Число фокусов   | 1, 2, 3, 4   |
| Число фокусных позиций                                  | 0–15   |
| Сегментное регулирование акустической выходной мощности | Есть   |

Для измерений интенсивности УЗ-излучения диагностического сканера EDAN U50 используется метод взаимности, основанный на приеме сигналов с излучающей поверхности УЗ-датчика диагностического сканера с помощью точечного гидрофона, откалиброванного по чувствительности в широком диапазоне частот с использованием имитатора виброскорости.

Имитатор виброскорости представляет собой магнит (ниодим железо бор) размером  $12 \times 20 \times 7$  мм, создающий сильное магнитное поле. В это сильное магнитное поле помещена катушка индуктивности с числом витков  $n = 10$ , выполненная из медной проволоки диаметром  $d = 0,09$  мм, по которой пропускаем электрический ток. Чем сильнее сила тока и магнитное поле, а следовательно больше магнитная индукция, тем большие колебания будет совершать катушка. Через слой клея колебания, вызываемые катушкой, передаются в оргстеклянную призму, играющую роль протектора. Принцип действия имитатора виброскорости и направление магнитных линий, действующих на проводник с током, вызывая его колебания, показаны на рис. 1.

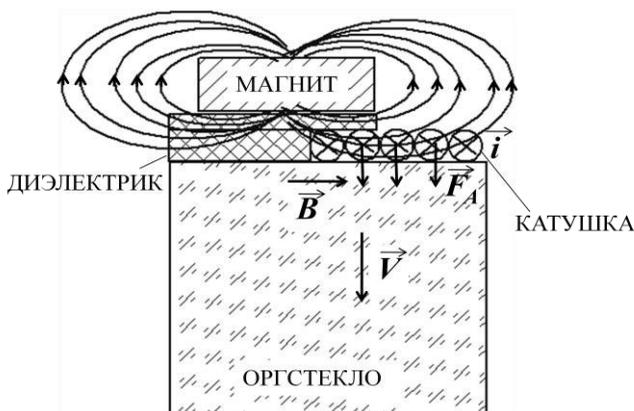


Рис. 1. Принцип действия имитатора виброскорости

Точечный приемник УЗ-колебаний состоит из чувствительного элемента малых размеров, протектора, демпфера и корпуса, выполненного из металла для экранирования пьезоэлемента и проводников от электромагнитных помех. В качестве чувствительного элемента использована пьезопластина ЦТС-19 толщиной  $d_{mn} = 0,67$  мм и линейными размерами  $2 \times 2$  мм, площадь ПП  $S_{mn} = 4$  мм<sup>2</sup>.

Точечный приемник калибруют с помощью имитатора виброскорости, подавая фиксированное для данной частоты значение виброскорости,

сти контактным способом. В качестве контактной жидкости используют воду. Схема калибровки УЗ-точечного приемника приведена на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема калибровки приемника УЗ-колебаний с использованием имитатора виброскорости

Измеряя значение электрического напряжения  $U$ , снятого с преобразователя, получаем чувствительность по уровню интенсивности  $S_I$ :

$$S_I = \frac{U^2}{I_{\text{им}}}, \quad (1)$$

где  $U$  – значение электрического напряжения при регистрации сигнала, принятого от имитатора виброскорости;  $I_{\text{им}}$  – интенсивность УЗ-излучения.

На рис. 3 представлены результаты калибровки приемника ультразвука по уровню интенсивности  $S_I$  в диапазоне частот от 0,8 МГц до 10 МГц.

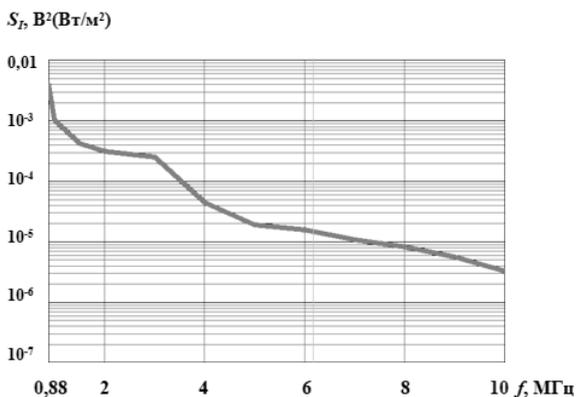


Рис. 3. Зависимости чувствительности приемника УЗ-колебаний от частоты по уровню интенсивности  $S_I$

Откалиброванный приемник используют для оценки интенсивности излучения на корпусе излучателя различного ультразвукового оборудования. Схема измерения приведена на рис. 4.



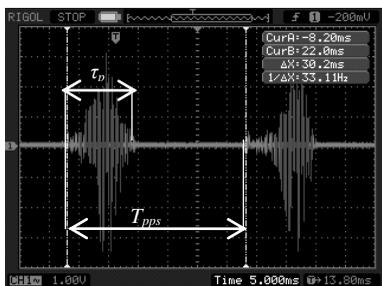
Рис. 4. Блок-схема измерения интенсивности УЗ-излучения

Расчет пик-пространственной усредненной по времени интенсивности определяется следующей формулой:

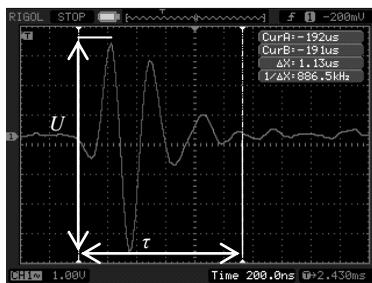
$$I_{SPTA} = 6U^2\tau\tau_p / ST_rT_{pps}, \quad (2)$$

где  $U$  – амплитуда импульса, В;  $\tau$  – длительность отдельного импульса, мкс;  $T_r$  – период следования импульсов в излучаемом волновом пакете импульсов, мкс;  $\tau_p$  – длительность волнового пакета импульсов, мс;  $T_{pps}$  – период следования волновых пакетов импульсов за одну линию сканирования, мс;  $S$  – чувствительность точечного гидрофона, В<sup>2</sup>/(Вт/см<sup>2</sup>).

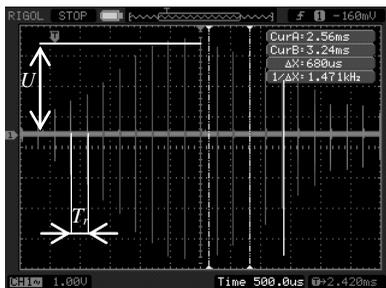
Вид временных разверток сигнала, принятого гидрофоном с поверхности датчика УЗ-сканера в различных временных масштабах, представлен на рис. 5.



Волновые пакеты импульсов



Импульс в волновом пакете  
импульсов



Импульсы за одну линию  
сканирования

Рис. 5. Вид временной развертки принятого сигнала

## Результаты и обсуждение

Проведены исследования влияния настроек УЗ-сканера EDAN U50 на уровень интенсивности ультразвукового излучения. Работа проведена при использовании конвексного датчика в В-режиме при варьировании следующих настроек: частота УЗ-излучения – 2,5 МГц, 3,5 МГц и 4,5 МГц, количество фокусов – 1, 2, 3, 4, количество фокус-позиций – 0, установленная глубина обзора (RGD) – 5 мм, 15 мм, 25 мм. Результаты влияния настроек сканера на уровень интенсивности представлены на рис. 6.

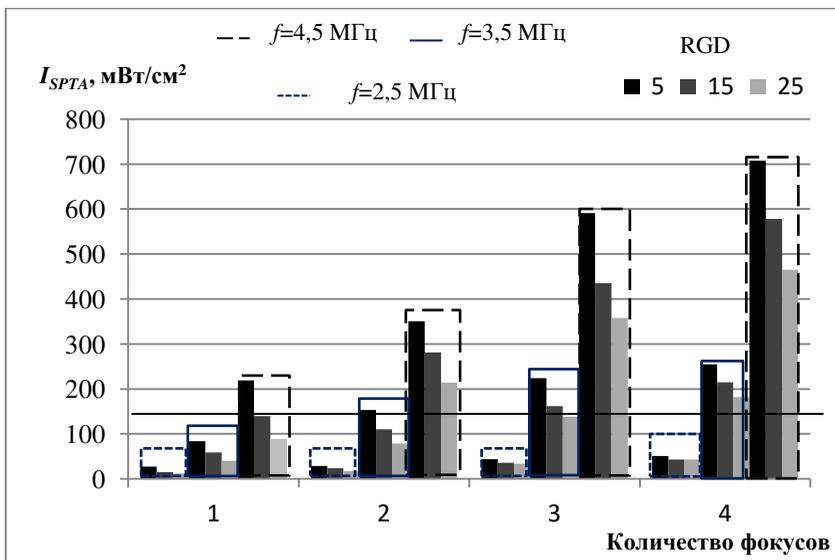


Рис. 6. Результаты измерения интенсивности  $I_{SPTA}$  на поверхности конвексного датчика УЗ-сканера при различных значениях RGD (мм)

Из полученных результатов следует, что значение интенсивности УЗ-излучения растёт с увеличением числа фокусов и частоты излучения, а с ростом RGD, наоборот, уменьшается. Также исследования показали, что значения  $I_{SPTA}$  существенно превышают предельно допустимый уровень –  $100 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , регламентируемый ГОСТ ИЕС 61157-2013, за исключением работы датчика на частоте  $2,5 \text{ МГц}$ .

### Заключение

Таким образом, можно сделать следующий вывод. Варьирование настроек сканера может существенно изменить значения интенсивности УЗ-излучения. Увеличение частоты излучения датчика, а также увеличение числа фокусов приводит к существенному росту значений интенсивности ультразвукового излучения, а с ростом глубины обзора интенсивность излучения уменьшается.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (проект №12.06.01/18МОВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

### Список литературы

1. ГОСТ ИЕС 61157–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Изделия медицинские электрические. Приборы ультразвуковые диагностические. Требования к представлению параметров акустического выхода в технической документации. Введ. 01.01.2016. М. : Стандартинформ, 2014. 32 с.
2. *Енуяков, А. М.* Metrological problems of testing medical ultrasonic equipmen // Biomedical Engineering. Vol. 35, no. 3, 2001, pp. 141-142.
3. *Хилл, К.* Ультразвук в медицине. Физические основы применения / под ред. К. Хилла ; пер. Л. Р. Гаврилов, В. А. Хохлова, О. А. Сапожников. М. : Физматлит, 2008. 544 с.
4. *Енуяков, А. М.* Metrological support for hydroacoustical measurements at frequencies of 1-15 MHz // Translated from Izmeritel'naya Tekhnika. No. 2, pp. 64-65, February, 1993.
5. *Енуяков, А. М.* Parameter measurement for the acoustic output of hand held ultrasonic fetal heartbeat detectors. Measurement Techniques. Vol. 49, no. 11, 2006.
6. *Каневский, И. Н.* Постоянные силы, возникающие в звуковом поле. Обзор // Акуст. журн. 1961. Т. 7, № 1. С. 3–17.

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

*A. D. Shirobokova*, student

*Yu. S. Gulyaeva*, postgraduate student

*T. A. Khalturiha*, senior lecturer

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Study of the Influence of the Depth of View on the Level of Ultrasound Intensity

*The article shows the effect of the selected parameters of the ultrasound scanner on the values of the intensity of ultrasound radiation. Studies have been carried out on the effect on the level of ultrasonic radiation intensity in the B-mode of such scanner settings as: ultrasonic radiation frequencies, number of foci and RGD.*

**Keywords:** intensity of ultrasonic radiation, RGD, number of focuses, ultrasonic frequency, safety.

УДК 620.179.16

*И. В. Булдакова*, аспирант

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

*Н. Л. Трофимова, М. В. Смольников, И. В. Коротков*, магистранты

E-mail: pmkk@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Измерение двухосных напряжений в замках бурильных труб**

*Приведена методика определения двухосных напряжений в образцах замков бурильных труб методом акустоупругости с использованием электромагнитно-акустического структуроскопа. Методика реализуется за счет прозвучивания образца в одном сечении с использованием продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации. Оценено влияние условий проведения измерений и термообработки на распределение внутренних напряжений. Показано, что распределение внутренних напряжений, как в окружном направлении, так и по образующей является неравномерным.*

**Ключевые слова:** замок бурильной трубы, метод акустоупругости, двухосные напряжения, продольная и поперечная волна.

### **Введение**

Эксплуатация бурильных труб связана с работой в сложном напряженно-деформированном состоянии и контактом с коррозионно-агрессивной средой, что приводит к выходу из строя вследствие коррозионно-усталостного разрушения их элементов. Причем в большинстве случаев разрушение происходит в местах концентрации напряжений, таких как замки бурильных труб. В связи с этим большое значение в надежной эксплуатации бурильных труб приобретает контроль внутренних напряжений.

Перспективными методами контроля напряжений являются магнитные [1, 2] и акустические методы [3–6]. Акустические методы основаны на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде и обладают рядом преимуществ, среди которых можно выделить возможность определения поверхностных и внутренних напряжений, многообразие типов используемых волн и регистрируемых параметров.

Целью работы являлась оценка внутренних напряжений в замках бурильных труб в заводских и лабораторных условиях, а также после тер-

мообработки с использованием продольной волны и двух поперечных волн с взаимно-перпендикулярной поляризацией.

### Описание эксперимента

Оценка внутренних напряжений проводилась на двух образцах замков бурильных труб, предоставленных Пермской компанией нефтяного машиностроения (ПКНМ): образец № 1 (а) с внешним диаметром 178 мм и толщиной стенки 71 мм, образец № 2 (б) с внешним диаметром 200 мм и толщиной стенки 70 мм (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид заготовок замков бурильных труб

Эксперименты выполнялись в два этапа. На первом этапе измерения были выполнены непосредственно на территории завода-изготовителя после всех стадий производства замков бурильных труб. Второй этап проводился в лабораторных условиях ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, при этом образец № 2 был подвергнут дополнительной термообработке, включающей в себя нормализацию (нагрев до  $T = 880$  °С, охлаждение на воздухе), закалку (нагрев до  $T = 880$  °С, охлаждение в полимере) и последующий отпуск (нагрев до  $T = 580$  °С, охлаждение в полимере).

В основе методики измерения внутренних напряжений в замках бурильных труб лежит метод акустопругости, основанный на зависимости скоростей распространения ультразвуковых волн от механических напряжений [6].

Двухосные напряжения определялись в соответствии с ГОСТ 52731–2007 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования». Методика основана на измерении времен распространения продольной волны и двух сдвиговых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации, с учетом коэффициентов акустопругости материала, при этом осевые  $\sigma_1$  и окружные  $\sigma_2$  напряжения рассчитываются по формулам:

$$\sigma_1 = K_1 \cdot \left( \frac{t_{0r1} \cdot t_l}{t_{0l} \cdot t_{r1}} - 1 \right) - K_2 \cdot \left( \frac{t_{0r2} \cdot t_l}{t_{0l} \cdot t_{r2}} - 1 \right), \quad (1)$$

$$\sigma_2 = K_1 \cdot \left( \frac{t_{0t2} \cdot t_l}{t_{0l} \cdot t_{t2}} - 1 \right) - K_2 \cdot \left( \frac{t_{0t1} \cdot t_l}{t_{0l} \cdot t_{t1}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $t_{t1}$ ,  $t_{t2}$ ,  $t_l$  – значения временных задержек с вектором поляризации вдоль образующей ( $t_{t1}$ ), вдоль окружности ( $t_{t2}$ ) и продольной волны ( $t_l$ ),  $t_{0t1}$ ,  $t_{0t2}$ ,  $t_{0l}$  – нулевые значения временных задержек соответствующих типов волн («нули отсчета»),  $K_1$ ,  $K_2$  – коэффициенты упругоакустической связи материала объекта ( $K_1 = -109$  ГПа,  $K_2 = -19$  ГПа) [6].

Измерения выполнялись в 8 точках по окружности замка бурильной трубы и по трем осям цилиндрической поверхности.

Для возбуждения и приема поперечных ультразвуковых волн с взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации использовался ЭМА-преобразователь, входящий в состав специализированного структуроскопа СЭМА, разработанного на кафедре «Приборы и методы измерения, контроля, диагностики» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова [7]. Специализированное программное обеспечение «Принц» позволяет определять время распространения ультразвуковых волн по разнице между первым и вторым эхо-импульсом серии многократных отражений.

Регистрация продольной волны выполнялась с помощью прямого пьезоэлектрического преобразователя с рабочей частотой 5 МГц, подключаемого к универсальному дефектоскопу DIO 1000.

В качестве «нулей отсчета» акустических параметров были использованы точки, в которых разница времен распространения сдвиговых волн с различной поляризацией имела минимальное значение для измерений, выполненных в лабораторных условиях.

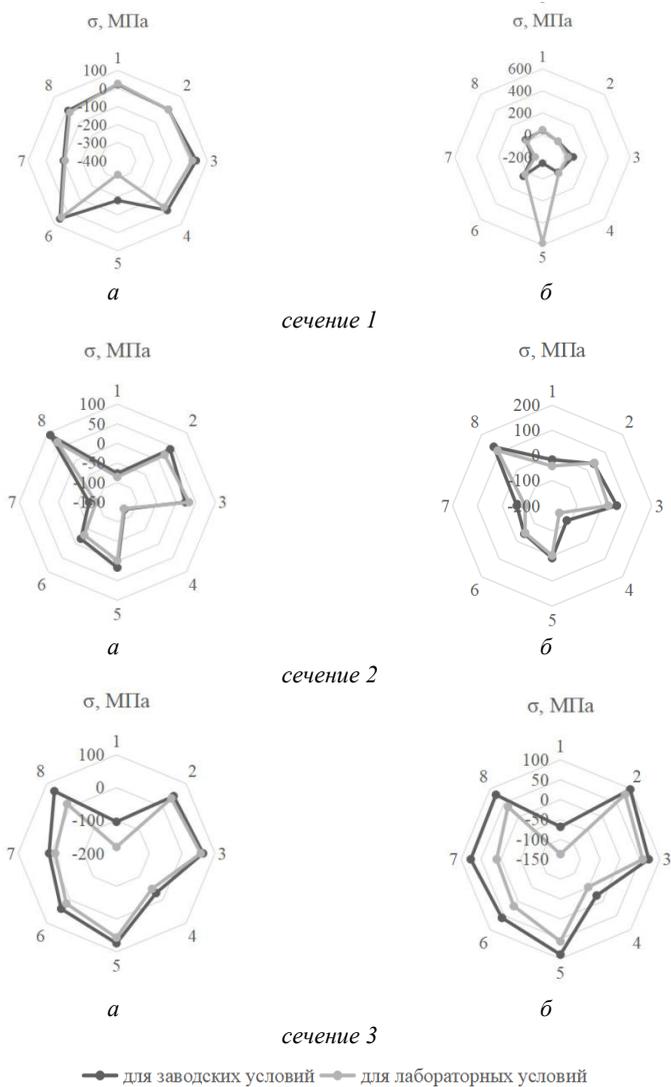
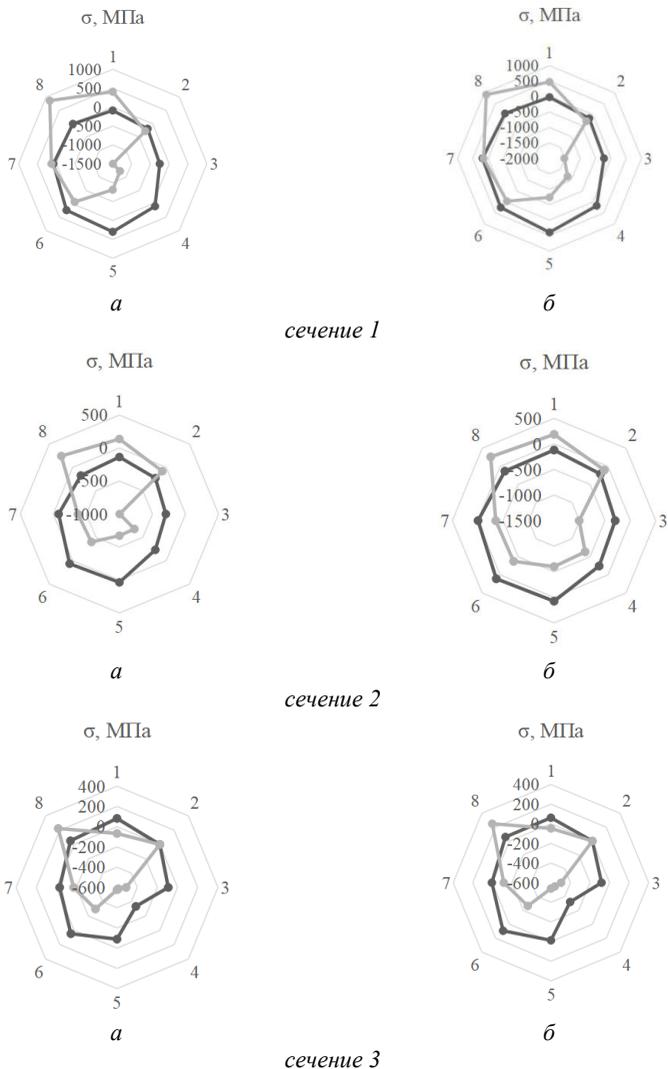


Рис. 2. Распределение напряжений в продольном (осевом) (а) и поперечном (по огибающей) (б) направлениях по трем сечениям для образца № 1



—●— для заводских условий —●— для лабораторных условий и после термообработки

Рис. 3. Распределение напряжений в продольном (осевом) (а) и поперечном (по огибающей) (б) направлениях по трем сечениям для образца № 2

## Результаты и их обсуждение

Результаты оценки относительного распределения внутренних напряжений по трем сечениям образцов представлены на рис. 2 и 3.

Распределение напряжений по сечениям образцов неравномерно как в осевом направлении  $\sigma_1$ , так и в окружном направлении  $\sigma_2$  и различается для измерений, выполненных в заводских и лабораторных условиях, а также до и после термообработки.

Разница в результатах измерения напряжений в заводских и лабораторных условиях для образца № 1 составляет от  $-10$  МПа до  $80$  МПа. Исключение составляет точка 5 по оси  $I$ , в которой наблюдается резкое увеличение значения напряжений, где по данным завода-изготовителя имеется дефект.

Термообработка образца № 2 привела к увеличению значения зарегистрированных напряжений и большему разбросу по сечениям. Так, наибольший разброс напряжений по окружности до термообработки наблюдался в сечении 1, и разница в значениях напряжений составляла  $600$  МПа. После термообработки максимальный разброс наблюдается также в сечении 1, с разницей в значениях напряжений  $2400$  МПа.

## Выводы

В результате экспериментального исследования образцов замков буровых труб оценено влияние условий проведения измерений и термообработки на распределение внутренних напряжений.

По результатам оценки напряжений получено, что в сечениях наблюдается неравномерность распределения внутренних напряжений как по окружности, так и по образующей образцов. Наличие дефекта приводит к резкому увеличению значений напряжений, а термическая обработка привела к увеличению разброса напряжений по сечению.

Следует отметить, что предложенная методика позволяет оценить усредненные по толщине стенки напряжения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

## Список литературы

1. Магнитный контроль напряженного состояния при сложном сопротивлении металла и снижении величины остаточных механических напряжений буровых труб / Т. Р. Загидулин, Р. В. Загидулин, В. Р. Мардамшин, Т. А. Бакiev // Научные труды НИПИ НЕФТЕГАЗ ГНКАР. 2018. № 2. С. 49–57.

2. *Гарифуллин, Н. М.* Система дистанционного контроля напряженно-деформированного состояния трубопроводов на базе электромагнитного метода // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22, № 2. С. 336–339
3. *Муравьев, В. В.* Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82, № 12. С. 52–57.
4. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 1. – С. 41–44.
5. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес : монография / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов ; отв. ред. В. В. Муравьев. Ижевск, 2014. 180 с.
6. *Никитина, Н. Е.* Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов / Н. Е. Никитина, А. В. Камышев, С. В. Казачек // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 53–59.
7. 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 (17). С. 243–250.

*I. V. Buldakova*, postgraduate student

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor

*N. L. Trofimova, M. V. Smolnikov, I. V. Korotkov*, master students

E-mail: pmkk@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

## Measurement of Biaxial Stresses in Tool Joints

*The method for determining biaxial stresses in samples of tool joints is report using the acoustoelasticity method and electromagnetic-acoustic structuroscope. Technique is implemented by sounding the sample in one section using a longitudinal wave and two shear waves with mutually perpendicular polarization planes. The effect of measurement conditions and heat treatment on the distribution of internal stresses is estimated. It is shown that the internal stress distribution, both in the circumferential direction and along the generatrix, is uneven.*

**Keywords:** tool joint, acoustoelasticity method, the biaxial stress, longitudinal and transversal waves

УДК 620.179.161

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.  
С. К. Водеников, канд. техн. наук, доц.  
М. А. Перовошикова, магистрант  
E-mail: ludmila396@rambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Исследование параметров вихретокового контроля электропроводности и плотности терморасширенного графита**

*В статье рассмотрены результаты возможности контроля листов и матов из терморасширенного графита методом вихревых токов. Определена оптимальная частота тока возбуждения вихретокового преобразователя, оценено влияние зазора на изменение сигнала. Установлено, что оптимальной частотой для контроля ТРГ является частота 1 МГц, которая позволяет отстроиться от влияния толщины объектов контроля. Увеличение зазора до 500 мкм приводит к уменьшению чувствительности контроля до 20 %.*

**Ключевые слова:** терморасширенный графит, вихретоковый контроль, индуктивная катушка, комплексное сопротивление, частота, зазор.

### **Введение**

На сегодняшний момент разрабатывается большое количество материалов на основе углерода [1–4], к которым промышленность все чаще устанавливает высокие требования к физико-химическим и механическим свойствам создаваемых конструкционных материалов. Одним из новых материалов с уникальными физическими, химическими и механическими свойствами является терморасширенный графит (ТРГ). ТРГ получают из природного графита через стадию синтеза интеркалированного графита. Процесс получения ТРГ заключается в окислении серной кислотой крупночешуйчатого природного графита, последующей промывке от непрореагировавшей кислоты и просушивании. Готовый интеркалированный графит подвергают ударному нагреву при температуре 900–1500 °С, в результате чего получается так называемый ТРГ-пух [5–7].

Для последующего изготовления из ТРГ-пуха фольги ТРГ, графитового прокладочного материала, графитовых уплотнений, сальниковых колец, плетеных набивок [8–11] ТРГ-пух подвергается прокатке с добавлением связующих и армирующих элементов, которые придают материалу уникальные физические и механические свойства [12].

Однако в процессе проката и изготовления изделий могут появиться различные дефекты, в частности неравномерность свойств по электропроводности, а также изменение плотности листов по площади.

Одним из наиболее перспективных методов контроля структуры материалов на сегодняшний день является акустический метод [13–16], позволяющий проводить контроль структуры без контакта с поверхностью, с высокой скоростью и точностью, однако для контроля необходима достаточно большая толщина объекта во избежание попадания сигналов в мертвую зону контроля, что ограничивает применение данного метода для тонких листов.

Среди известных методов контроля электропроводности материалов широко используется электрический метод, основанный на регистрации параметров электрического поля, а также электромагнитный (вихретоковый) метод, основанный на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с объектом контроля [17–20]. Недостатком электрического метода для контроля электропроводности ТРГ является необходимость осуществления контакта электродами на поверхность объекта контроля, что может повредить поверхность объекта контроля, а также уменьшает скорость проведения контроля. Вихретоковый неразрушающий контроль позволяет проводить контроль без контакта между преобразователем и объектом контроля, что значительно повышает скорость, кроме того, вихретоковый метод контроля чувствителен к структуре материала [21–22], а значит, может быть пригоден для контроля изменения плотности ТРГ.

Цель данной работы заключается в оценке оптимальных характеристик контроля ТРГ-листов – исследовании оптимальной частоты тока возбуждения преобразователя, влияния зазора на чувствительность контроля, а также возможности оценки неравномерности плотности и электропроводности по толщине листов ТРГ.

### **Сведения из теории**

Для возбуждения и приема вихревых токов при электромагнитном контроле используется индуктивная катушка [23–25] с синусоидальным током определенной частоты. Частота возбуждения вихревых токов зависит от целей контроля; так, при дефектоскопии используются частоты от 70 до 100 кГц, а при структуроскопии – частоты от 1 МГц. При приближении такой катушки к электропроводящему объекту контроля в объекте контроля возникают вихревые токи, создающие электромагнитное поле вихревых токов, которое изменяет активное  $R$  и индуктивное  $L$ , а также и комплексное сопротивление  $Z$ . По изменению комплексно-

го сопротивления катушки судят об изменениях параметров объекта контроля.

### Описание эксперимента

Для контроля ТРГ-листов был изготовлен накладной вихретоковый преобразователь с круговой формой витков, который подключался к измерителю иммитанса МНИПИ Е7-20, при помощи которого измерялось комплексное сопротивление катушки индуктивности (рис. 1).



Рис. 1. Установка для измерения листов и матов ТРГ методом вихревых токов

В ходе исследований для определения оптимальных условий контроля изменялась частота тока возбуждения вихретокового преобразователя и зазор между преобразователем и объектом контроля.

Исследования были проведены на 15 образцах ТРГ – 11 листах и 4 матах с различной плотностью  $\rho$  и толщиной  $h$ . Характеристики образцов представлены в таблице. Исследуемые образцы измерялись в 25 точках, на одинаковом расстоянии друг от друга, равном 2 см, так, как показано на рис. 2. Известно, что одним из мешающих факторов при вихретоковом контроле является краевой эффект, во избежание получения помехи при контроле катушка устанавливалась на расстоянии половины диаметра катушки от края образца.

**Характеристика образцов**

| Листы     |                            |          |
|-----------|----------------------------|----------|
| № образца | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $h$ , мм |
| 1         | 1108                       | 1,5      |
| 2         | 458                        | 1,4      |
| 3         | 675                        | 1,4      |
| 4         | 750                        | 1,4      |
| 5         | 877                        | 1,4      |
| 6         | 1023                       | 1,5      |
| 7         | 1042                       | 1,5      |
| 8         | 1205                       | 1,5      |
| 9         | 1299                       | 1,5      |
| 10        | 1316                       | 1,5      |
| 11        | 1377                       | 1,5      |
| Маты      |                            |          |
| 1         | 120                        | 7,5      |
| 2         | 145                        | 7,5      |
| 3         | 197                        | 8        |
| 4         | 207                        | 8        |

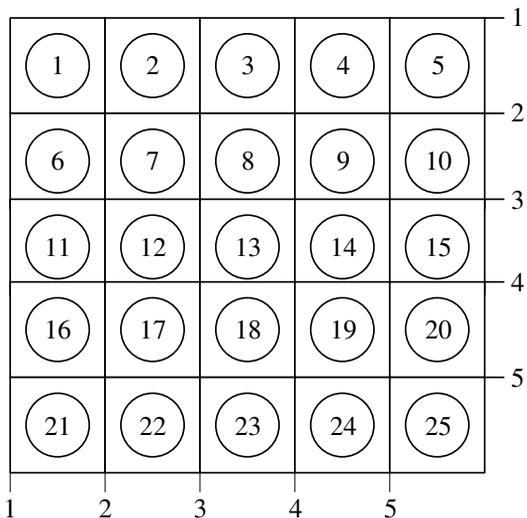


Рис. 2. Схема измерения листов и матов ТРГ преобразователем

### Результаты и их обсуждение

Для оценки оптимальной частоты контроля на исследуемой катушке изменилась частота контроля от 50 кГц до 1 МГц. По формуле (1) определялась чувствительность  $S_f$  от изменения частот, при этом все значения комплексного сопротивления в 25 точках приводились к усредненным значениям.

$$S_f = \frac{Z_2 - Z_1}{f_2 - f_1}, \quad (1)$$

где  $S_f$  – чувствительность ВТП от частоты;  $Z$  – комплексное сопротивление (усредненное значение по 25 точкам);  $f$  – частота. Графики зависимости чувствительности от частоты в матах и листах представлены на рис. 3.

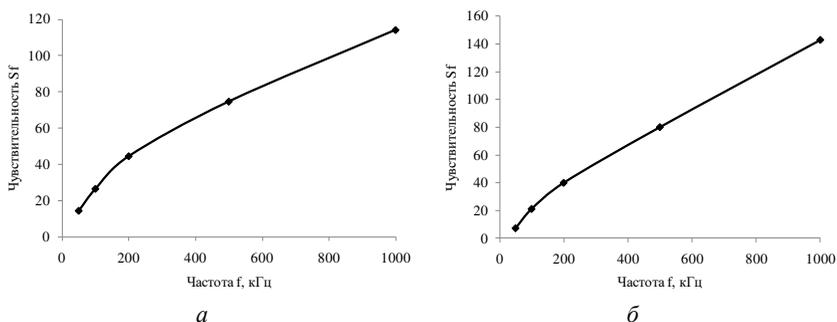


Рис. 3. Графики зависимости чувствительности от частоты:  
 $a$  – для листа;  $б$  – для мата

Из графиков зависимости чувствительности от изменения частоты тока возбуждения вихретокового преобразователя видно, что чувствительность увеличивается при увеличении частоты.

Влияние зазора на результат контроля оценивался при изменении величины воздушного зазора между преобразователем и объектом контроля от 0 до 500 мкм.

Графики зависимости изменения относительного сопротивления катушки от зазора в матах и листах представлены на рис. 4.

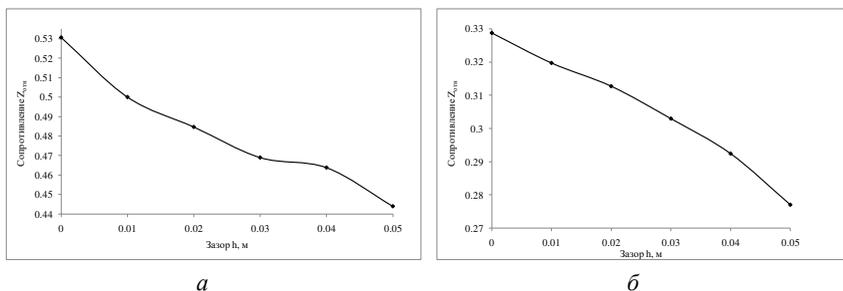


Рис. 4. Графики зависимости чувствительности от зазора:  
*a* – для листа; *б* – для мата

Из графиков видно, что с увеличением зазора на 0,05 мм чувствительность падает на величину около 20 %, что необходимо учитывать при разработке методики бесконтактного контроля листов ТРГ.

С целью выявления неравномерности свойств в листах ТРГ была проведена оценка распределения относительного комплексного сопротивления по площади листов. Относительное комплексное сопротивление рассчитывалось по формуле

$$Z_{отн} = \left| \frac{Z - Z_0}{Z_0} \right|, \quad (2)$$

где  $Z$  – вносимое сопротивление преобразователя от действия вихревых токов в объекте контроля;  $Z_0$  – сопротивление вихретокового преобразователя в режиме холостого хода.

По результатам оценки получены поверхностные диаграммы распределения относительного комплексного сопротивления по поверхности листов и матов ТРГ (рис. 5).

Анализ поверхностных диаграмм показывает, что в ряде листов и матов наблюдается относительно равномерное распределение относительного комплексного сопротивления, разброс значений в этом случае не превышает 4 %. В то же время ряд образцов обладают значительным разбросом в изменении комплексного сопротивления по площади до 30 %, что может быть связано с изменением электропроводящих свойств объекта контроля, вызванных неравномерным распределением армирующих и связующих элементов при производстве. Кроме того, неравномерность распределения сопротивления может быть связана с неравномерной плотностью объектов ТРГ после проката.

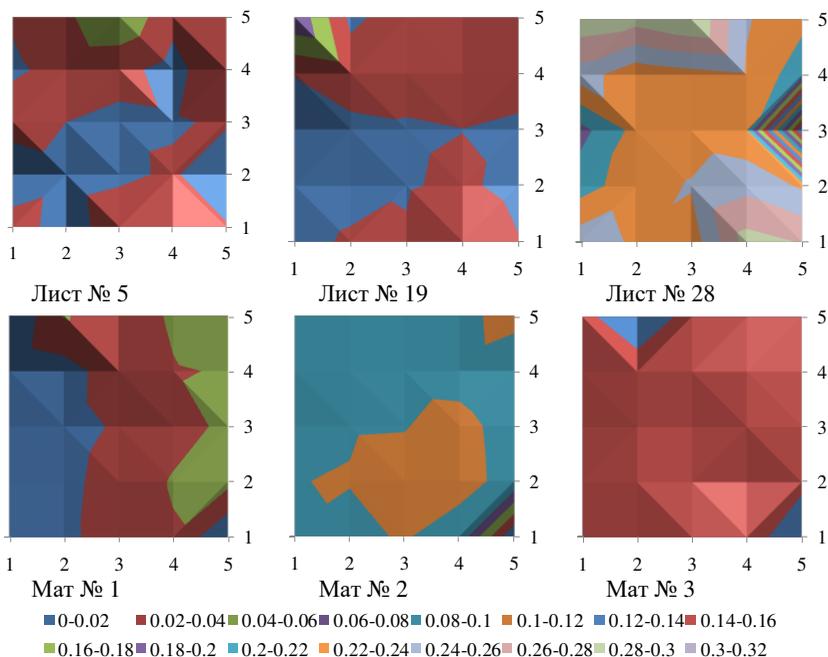


Рис. 5. Поверхностные диаграммы распределения относительного сопротивления по площади листов и матов ТРГ

## Выводы

По результатам проведенных исследований характеристик вихревого преобразователя для контроля объектов из терморасширенного графита было получено, что оптимальной частотой для контроля свойств ТРГ является частота 1 МГц, которая позволяет добиться максимальной чувствительности контроля. Увеличение зазора уменьшает чувствительность контроля до 20 % при зазоре 500 мкм, что необходимо учитывать при разработке технологии контроля ТРГ методом вихревых токов.

Предварительные испытания применения вихревых токов для контроля листов и матов из ТРГ показали неравномерность распределения относительного комплексного сопротивления в ряде образцов, что может быть связано с изменением плотности объектов или изменением электропроводности, что требует дополнительных исследований.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

#### Список литературы

1. *Du, J.* Synthesis of mechanically robust porous carbon monoliths for CO<sub>2</sub> adsorption and separation / J. Du, W.-C. Li, Z.-X. Ren, L.-P. Guo, A.-H. Lu // *Journal of Energy Chemistry*. 2020. Vol. 42. Pp. 56–61.
2. *Wang, H.* Stress dependence of indentation modulus for carbon fiber in polymer composite / H. Wang, H. Zhang, D. Tang, K. Goto, I. Watanabe, H. Kitazawa, M. Kawai, H. Mamiya, D. Fujita // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2019. Vol. 20, Issue 1. Pp. 412–420.
3. *Safari Naderi, M. H.* Delamination analysis in composite root of a carbon-layer reinforced wind turbine blade / M. H. Safari Naderi, H. Ekhteraei Toussi, A. Ghasemi Ghalebahman // *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2019. Vol. 6, Issue 1. Pp. 9–18.
4. *Cheng, X.* Bending shape memory behaviours of carbon fibre reinforced polyurethane-type shape memory polymer composites under relatively small deformation: Characterisation and computational simulation / X. Cheng, Y. Chen, S. Dai, M.M.M. Bilek, S. Bao, L. Ye // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2019. Vol. 100, no. 103372.
5. *Афаносов, И. М.* Теплопроводность и механические свойства терморасширенного графита / И. М. Афаносов, Д. В. Савченко, С. Г. Ионов // *Неоргнические материалы*. 2009. Т. 45. С. 540–544.
6. Интеркалированные соединения графита акцепторного типа, новые углеродистые материалы на их основе / Н. Е. Сорокина, И. В. Никольская, С. Г. Ионов, В. В. Авеев // *Известия академии наук. Серия химическая*. 2005. № 8. С. 1699–1716.
7. *Махорин, К. Е.* Вспучивание природного графита, обработанного серной кислотой / К. Е. Махорин, А. П. Кожан, В. В. Веселов // *Химическая техника*. 1985. № 2. С. 3–6.
8. Коррозия стали 20Х13 в контакте с уплотнениями из терморасширенного графита и пути ее снижения / В. И. Кичигин, И. В. Петухов, М. Ю. Калашникова, О. Ю. Исаева // *Вестник ПГТУ. Проблемы современных материалов и технологий*. 2003. № 9. С. 122–129.
9. Модифицированные уплотнения из терморасширенного графита / М. Ю. Белова, И. А. Малкова, Т. М. Кузинова, А. С. Кольшкин, О. Ю. Исаев // *Арматуростроение*. 2006. № 3 (42). С. 67–71.
10. Синтез и изучение свойств палладиевых катализаторов на углеродных подложках из терморасширенного природного графита / Н. В. Чесноков, Б. Н. Кузнецов, Н. М. Микова, В. А. Финкельштейн // *Вестник КрасГУ*. 2004. С. 74–79.
11. Влияние физико-химических характеристик расширенного графита на свойства пластичных смазок / Р. Н. Абаджаева, О. И. Уманская, Ю. Л. Ишук,

А. А. Фаст, И. Л. Марьясин // Химия и технология топлив и масел. 1988. № 2. С. 32–33.

12. *Sanches, A. O.* Influence of polymer insertion on the dielectric, piezoelectric and acoustic properties of 1-0-3 polyurethane/cement-based piezo composite / A. O. Sanches, G. F. Teixeira, M. A. Zaghete, E. Longo, J. A. Malmonge, M. J. Silva, W. K. Sakamoto // *Materials Research Bulletin*. 2019. Vol. 119. P. 110541.

13. Акустическая структуроскопия стальных образцов, нагруженных изгибом с вращением при испытаниях на усталость / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. Ю. Будрин, М. А. Синцов, А. В. Зорин // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2019. Т. 22, № 1. С. 37–44.

14. *Murav'ev, V. V.* Correlation of rail structure with the rayleigh-wave velocity and the coercive force / V.V. Murav'ev, A.V. Baiteryakov, S.V. Len'kov, V.A. Zakharov // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47, no. 8. Pp. 561–563.

15. *Murav'ev, V. V.* Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of lamb waves / V. V. Murav'ev, O. V. Murav'eva, L. V. Volkova // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46, no. 10. Pp. 752–756.

16. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2014. 180 с.

17. *Чирков, А. В.* Вихретоковый контроль как часть входного контроля новых теплообменных аппаратов // *Химическая техника*. 2017. № 7. С. 14–16.

18. *Поляков, В. В.* Вихретоковый контроль удельной электрической проводимости и магнитной проницаемости изделий из магнитомягких материалов / В. В. Поляков, А. В. Егоров // *Дефектоскопия*. 1992. № 12. С. 78–80.

19. *Баранов, В. А.* Вихретоковый контроль содержания оксида гадолиния в ТВЭЛАХ / В. А. Баранов, В. В. Бразовский // *Электронный физико-технический журнал*. 2010. Т. 5. С. 15–20.

20. Вихретоковый преобразователь для контроля дефектов в композитных материалах металл – диэлектрик – металл / С. Ф. Дмитриев, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков, А. В. Ишков // *Известия Алтайского государственного университета*. 2014. № 1-2 (81). С. 168–171.

21. *Dmitriev, S.* Scanning the layered composites using subminiature eddy-current transducers / S. Dmitriev, A. Ishkov, A. Grigorev, L. Shevtsova, V. Malikov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 982. Pp. 701–708

22. *Suresh Kumar, S.* Experimental Studies on Qualification of Structural Integrity of Eddy Current Flow Meter / S. Suresh Kumar, S. Patri, R. K. Sharma, R. Punniamoorthy, V. D. Paunikar, R. J. Cyriac, S. Harishkumar, P. Vasudevan, R. Ramakrishna, S. D. Sajish, V. A. Suresh kumar, S. Chandramouli, C. Meikandamurthy, B. K. Sreedhar, K. Sathishkumar, I. B. Noushad, S. Murugan, P. Selvaraj // *Lecture Notes in Mechanical Engineering* 2020. 2018. Pp. 787–799.

23. Высокостабильный вихретоковый преобразователь для контроля толщины диэлектрических покрытий на металлоизделиях / Г. М. Сучков, Ю. В. Хомяк, С. Н. Глоба, Ч. Х. Ле // *Измерительная техника*. 2016. № 4. С. 19–21.

24. *Chady, T.* Eddy current transducer with rotating permanent magnets to test planar conducting plates / T. Chady, J.M. Grochowalski // *Sensors (Switzerland)*. 2019. Vol. 19, Issue 6. P. 1408

25. *Malikov, V. N.* Subminiature eddy-current transducers for studying steel to dielectric junctions / V. N. Malikov, S.F. Dmitriev, A.O. Katasonov, A.M. Sagalakov, A.V. Ishkov // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. P. 040057.

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor  
*S. K. Vodenikov*, CSc in engineering, associate professor  
*M. A. Perevoshchikova*, master student  
E-mail: ludmila396@rambler.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Investigation of Parameters of Eddy Current Testing of Conductivity and Density of Thermally Expanded Graphite**

*The article discusses the results of the ability to control sheets and mats of thermally expanded graphite by the eddy current method. The optimal frequency of the excitation current of the eddy current transducer is determined, the influence of the gap on the signal change is estimated. It was established that the optimal frequency for controlling the TEG is the frequency of 1 MHz, which allows you to tune out from the influence of the thickness of the objects of control. An increase in the gap to 500  $\mu\text{m}$  leads to a decrease in the sensitivity of control to 20%.*

**Keywords:** thermally expanded graphite, eddy current control, inductive coil, complex resistance, frequency, gap.

УДК 620.179.16

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

*Р. М. Исмаилов*, магистрант

*М. А. Синцов*, начальник лаборатории, аспирант

E-mail: rusel356@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **Оценка внутренних механических напряжений и упругих модулей в металле магистральных газопроводов**

*В статье представлены результаты оценки внутренних механических напряжений и упругих модулей в образцах вырезов магистральных газопроводов с коррозионным растрескиванием и сварным соединением. По результатам измерений установлено, что в образцах с коррозионным растрескиванием наблюдается повышенный уровень внутренних напряжений, а также неравномерность распределения напряжений по поверхности образца. Сварное соединение значительно влияет на перераспределение напряжений, особенно в зоне сварного шва, а также влияет на анизотропию свойств металла объекта контроля.*

**Ключевые слова:** внутренние механические напряжения, модули упругости, неразрушающий контроль, поперечная волна, продольная волна.

### **Введение**

Остаточные напряжения – это упругая деформация и соответствующее ей напряжение в твердом теле при отсутствии механического воздействия на него извне. Внутренние остаточные напряжения в изделиях создаются в процессе термообработки, при переходе из жидкого в твердое состояние, механической обработке, сварке и других технологических процессах изготовления изделия [1–5]. Внутренние напряжения являются одним из важных свойств в металлоизделиях и влияют на их прочностные характеристики, их высокий уровень может привести к появлению или росту трещин при последующей обработке изделия, эксплуатации и даже при хранении на складе [6–7].

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические и рентгеновские. Применяются также электрофизические методы, при которых остаточные напряжения находятся по изменению электромагнитных свойств материала поверхностного слоя детали. Однако данные методы определяют только поверхностные напряжения, для

определения внутренних напряжений используется акустический метод, основанный на явлении акустоупругости [8–13].

На прочностные и эксплуатационные характеристики и деформационное поведение также влияют упругие модули. Известно, что величина коэффициента Пуассона связана с деформационной прочностью при возникновении внутренних напряжений [14–18].

Проблема раннего обнаружения остаточных напряжений и модулей упругости в металлоконструкциях актуальна на сегодняшний день. Ранее выявление высокого уровня внутренних напряжений и изменения упругих модулей металла позволит избежать производственных, техногенных или транспортных катастроф.

В связи с этим разработка новых методов определения остаточных напряжений с наименьшими погрешностями является актуальной задачей.

Целью работы является оценка распределения внутренних механических напряжений и упругих модулей в образцах вырезок магистральных газопроводов на основе метода акустоупругости, в основе которого лежит измерение времени прихода импульса поперечных и продольных ультразвуковых волн.

### **Оборудование и экспериментальные исследования**

Основным методом определения напряженного состояния и упругих модулей элементов магистральных трубопроводов является акустоупругий метод, основанный на линейной зависимости скорости поперечных и продольных упругих волн от напряжений [1, 12].

Для определения зависимости распределения механических напряжений толстолистового проката использовались две установки: структуроскоп «СЭМА» (рис. 1, *а*) для возбуждения и приема двух поперечных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией и универсальный дефектоскоп DIO 1000 (рис. 1, *б*) для возбуждения и приема продольной ультразвуковой волны.

Структуроскоп «СЭМА» включает в себя генератор электрических импульсов, формирующий зондирующий импульс, ЭМА-преобразователь, возбуждающий и принимающий акустические импульсы, усилитель и плату АЦП, встроенную в ЭВМ, на экране которого отображается осциллограмма отраженных импульсов (рис. 2, *а*).

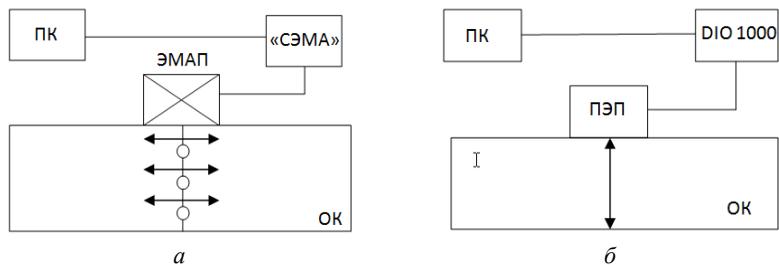
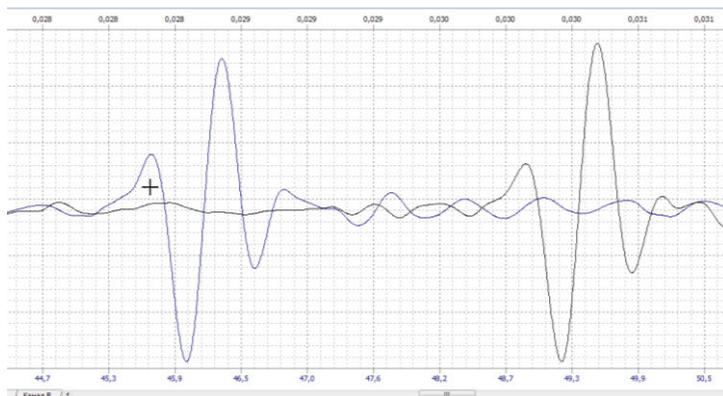


Рис. 1. Блок-схема: а – установка, возбуждающая поперечные волны в объекте контроля; б – установка, возбуждающая продольную волну в объекте контроля

Для возбуждения и приема ультразвуковой волны использовался высокочастотный дефектоскоп DIO 1000 и прямой пьезопреобразователь, обработка и анализ сигнала производится с использованием персонального компьютера (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Эхограммы принятых импульсов: а – поперечные волны; б – продольные волны

По полученным эхограммам сигналов продольной и двух поперечных волн определяется время прихода волн, по формулам (1) и (2) рассчитывается двухосное напряженное состояние элемента газопровода [19]:

$$\sigma_1 = K_1 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right), \quad (1)$$

$$\sigma_2 = K_1 \left( \frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right) - K_2 \left( \frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{1,2}$  – главные напряжения в плоскости;  $t_1$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению  $\sigma_1$ , в нагруженном материале;  $t_{01}$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению  $\sigma_1$ , в ненагруженном материале;  $t_2$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению  $\sigma_2$ , в нагруженном материале;  $t_{02}$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению  $\sigma_2$ , в ненагруженном материале;  $t_3$  – задержка импульса упругой продольной волны в нагруженном материале;  $t_{03}$  – задержка импульса упругой продольной волны в ненагруженном материале;  $K_{1,2}$  – коэффициенты упругоакустической связи, связывающие напряжение с изменением акустических параметров для волн, поляризованных вдоль и поперек его действия (соответственно), и продольной волны.

Коэффициенты акустоупругости вычисляются через известные модули упругости Ламе и Мурнагана или получены экспериментально. Сталь для магистральных газопроводов имеет следующее значение акустоупругости:  $K_1 = -102$  ГПа,  $K_2 = -12$  ГПа [8].

При контроле образца с использованием поперечной и продольной волн появляется возможность определения упругих моделей независимо от толщины изделия. По времени распространения поперечной волны и продольной волны рассчитывают коэффициент Пуассона, модуль сдвига и модуль Юнга соответственно по формулам (3)–(5) [20].

$$\nu = \frac{1 - 2\gamma^2}{2(1 - \gamma^2)}, \quad (3)$$

$$G = 4 \cdot C_t^2 \cdot \rho, \quad (4)$$

$$E = 2 \cdot G \cdot (\nu + 1), \quad (5)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\gamma^2 = \frac{C_t^2}{C_l^2} = \frac{t_l^2}{t_t^2}$  – отношение скоростей

поперечной и продольной волн, пропорциональное отношению времен их распространения;  $C_t$  – скорость поперечной волны;  $\rho$  – плотность;  $G$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль Юнга.

### Результаты и обсуждение

Внутренние напряжения и упругие модули оценивались в образцах: со сварным соединением (образец № 1 и № 2), с поверхностным коррозионным растрескиванием (образец № 3 и № 4) и без сварного соединения и коррозионных растрескиваний (образец № 5 и № 6). По результатам оценки остаточных напряжений оценены внутренние напряжения и упругие модули в шести образцах (табл. 1).

**Таблица 1. Результаты оценки механических напряжений и упругих модулей в вырезках магистральных газопроводов**

| № образца | $\sigma_1$ , МПа | $\sigma_2$ , МПа | $\nu$ | $G$ , МПа | $E$ , МПа |
|-----------|------------------|------------------|-------|-----------|-----------|
| 1         | -7               | 2                | 0,28  | 82        | 209       |
| 2         | -120             | 14               | 0,28  | 78        | 201       |
| 3         | -1473            | 183              | 0,27  | 77        | 217       |
| 4         | -1230            | 193              | 0,27  | 78        | 217       |
| 5         | -57              | 68               | 0,28  | 81        | 209       |
| 6         | -94              | 12               | 0,28  | 80        | 209       |

По результатам видно, что в образцах с коррозионным растрескиванием наблюдается повышенный уровень сжимающих осевых напряжений и растягивающих окружных напряжений. Значения модулей упругости в образцах с коррозионным растрескиванием также отличается от образцов без коррозионного растрескивания. В образцах со сварным швом уровень напряжений значительно отличается в области сварного соединения, где могут наблюдаться отрицательные значения напряжений. Так, отклонение напряжений относительно минимального значения в образцах со сварным швом изменяется до 75 %. В образцах с коррозионным растрескиванием – до 80 %, а в образцах без коррозионного растрескивания и сварного соединения – до 30 %.

По методике, предложенной в [20], по измеренным значениям модулей упругостей была произведена оценка анизотропии свойств металла. Анизотропия для образцов № 5 и № 6 по коэффициенту Пуассона составила 8–10 %, по модулю сдвига 6–8 %, а по модулю Юнга 15–20 %. Для образцов № 1 и № 2 со сварным соединением анизотропия составила 12, 10 и 13 % соответственно, в то время как для образцов № 3 и № 4 с коррозионным растрескиванием под напряжением наблюдается резкое уменьшение коэффициента анизотропии до 5 % по коэффициенту Пуассона, 4 % модулю сдвига и 2 % по модулю Юнга.

### **Вывод**

По результатам оценки внутренних напряжений получены значения внутренних механических напряжений в образцах вырезов магистральных газопроводов с коррозионным растрескиванием и со сварным соединением. Установлено, что в образцах с коррозионным растрескиванием наблюдаются повышенный уровень окружных и осевых напряжений, а также неравномерность распределения напряжений по сечению образца. Наличие сварного соединения также влияет на перераспределение внутренних механических напряжений и появление высокого уровня напряжений вблизи сварного соединения.

Оценка анизотропии свойств по значениям упругих модулей показала, что наличие коррозионного растрескивания уменьшает коэффициент анизотропии металла до 2–5 % и приводит к изменению значений упругих модулей до 4 %.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10122) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

### **Список литературы**

1. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 41–44.
2. Lian, Y. Effect of homogenization annealing on internal residual stress distribution and texture in ME21 magnesium alloy extruded plates / Y. Lian, P. Ji, J. Zhang, X. Yuan, W. Xu, Y. Zhao, J. Mo, L. Zheng, S. Dou // Journal of Magnesium and Alloys. 2019. Vol. 7, Iss. 1. Pp. 186–192.
3. Kamat, A. M. An analytical method to predict and compensate for residual stress-induced deformation in overhanging regions of internal channels fabricated

using powder bed fusion / A. M. Kamat, Y. Pei // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 29. P. 100796.

4. *Nicola, C.* System and method for controlled vibration stress relief of metal parts with residual internal stresses / C. Nicola, A. Vintilă, M. Nicola, V. Voicu, M. C. Nițu, M. Duță // 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2016. 2016. P. 7754660.

5. *Wang, J.* Influence of plasticity on generation and redistribution of residual stresses in offshore pipelines / J. Wang, A. Mirzaee-Sisan // International journal of pressure vessels and pipelines. 2018. Vol. 159. Pp. 101–110.

6. *Saito, Y.* Crack Propagation in a Continuously Cast Austenitic Stainless Steel Analyzed by Actual Residual Stress Tensor Distributions / Y. Saito, S.-I. Tanaka // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2016. Vol. 47, Iss. 2. Pp. 882–890.

7. *Kawai, S.* The measurement method of internal residual stress distribution concerned with fatigue crack growth / S. Kawai, T. Nagai, S. Okano, M. Mochizuki // Journal of the Japan Welding Society. 2016. Vol. 85, Iss. 2. Pp. 216–220.

8. *Nikitina, N. E.* Application of the acoustoelasticity phenomenon in studying stress states in technological pipelines / N. E. Nikitina, A. V. Kamyshev, S. V. Kazachek // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. Vol. 45, Iss. 12. Pp. 861–866.

9. *Чуньгуан, С.* Неразрушающий контроль остаточных напряжений с использованием ультразвуковой критической преломленной продольной волны // Физическая процедура. 2015. Т. 70. С. 594–598.

10. *Rossini, N. S.* Methods of Measuring Residual Stresses in Components / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi // Materials and Design. 2012. Vol 35. Pp. 572–588.

11. Пат. 2631236. МПК G01L 1/12, G01 N27/82. Устройство для контроля остаточных механических напряжений в деформированных ферромагнитных сталях / Сташков А. Н. Ничипурук А. П., Огнева М. С, Королев А. В. № 2016139743 ; заявл. 10.10.2016 ; опубл. 19.09.2017, Бюл. № 26.

12. *Wang, Wei.* An improved ultrasonic method for plane stress measurement using critically refracted longitudinal waves / W. Wang, Ch. Xu, Yum. Zhang, Yuf. Zhou // NDT & E International. 2018. Vol. 99. Pp. 117–122.

13. *Муравьев, В. В.* Оценка остаточных напряжений в бандажах локомотивных колёс методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, Е. Н. Бабобанов // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 22–28.

14. *Антонов, А. А.* Исследование полей остаточных напряжений в сварных конструкциях // Сварочное производство. 2013. № 12. С. 13–17.

15. *Babkin, S. E.* The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51, no. 5. Pp. 303–307.

16. *Hayase, T.* Measurement of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thermal Barrier Coating Based on Bending of Three-Layered Plate / T. Hayase, H. Waki // Journal of Thermal Spray Technology. 2018. 27 (6). Pp. 983–998.

17. *Gonchar, A. V.* Variation of elastic characteristics of metastable austenite steel under cycling straining / A. V. Gonchar, V. Mishakin, V. Klyushnikov, K. Kurashkin // *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, Iss. 4. Pp. 537-541.

18. *Mishakin, V. V.* Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel / V. V. Mishakin, V. A. Klyushnikov, A. V. Gonchar // *Technical Physics*. 2015. Vol. 60, Iss. 5. Pp. 665-668.

19 ГОСТ Р 52731–2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. 2007. 12 с.

20. *Волкова, Л. В.* Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // *Приборы и методы измерений*. 2019. Т. 10, № 1. С. 42–52.

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor

*R. M. Ismailov*, master student

*M. A. Sintsov*, head of laboratory, postgraduate student

E-mail: rusel356@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Assessment of Internal Mechanical Stresses and Elastic Modules in Metal of Gas Mains**

*Residual stresses affect the behavior of the product during processing, operation, and even when stored in a warehouse. Residual stresses are one of the important properties in metal products and affect their strength characteristics. The article describes a method for monitoring residual stress and elastic modules in the steel elements of main gas pipelines.*

**Keywords:** residual stress, elastic moduli, non-destructive testing, shear wave, longitudinal wave.

УДК 620.179.16

С. В. Казанцев<sup>1</sup>, магистрант  
E-mail: sergokazancev@mail.ru

В. В. Муравьев<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой  
E-mail: pmkk@istu.ru

<sup>1</sup> Ижевский государственный технический университет имени  
М. Т. Калашникова

<sup>2</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

### **Распространение головной волны в рельсах со стыком, выполненным электроконтактной сваркой**

*В статье представлены экспериментальные данные скорости головной волны, распространяющейся в отрезках рельсов, содержащих сварное соединение, выполненное электроконтактной сваркой. Скорость головной волны значительно уменьшается в месте стыка рельсов, имеет пик при удалении от него. Для возбуждения головной волны в рельсах использовался ультразвуковой преобразователь с переменным углом ввода, разработанный для более активно-го преобразования головной волны и других типов волн.*

**Ключевые слова:** головная ультразвуковая волна, сварное соединение, скорость ультразвука, деструктуризация.

#### **Введение**

Безопасность движения железнодорожных вагонов и локомотивов определяется надежностью рельсов. Рельсы во время эксплуатации испытывают циклические сжимающие и растягивающие нагрузки от изменения температур и движения вагонов. Так, особо опасным участком рельса становится стык, выполненный электроконтактной сваркой [1–4] и расположенный между двумя шпалами. При этом в головке и подошве стыка, где механические свойства могут быть ниже, чем в остальной части рельса, возникают переменные растягивающие и сжимающие напряжения при движении по нему колес локомотивов и подвижных составов [5].

Поэтому поиск и разработка новых методов определения связи между состоянием металла и информативными параметрами ультразвуковых волн является актуальной задачей.

Применение ультразвука для поставленных задач позволяет контролировать изделия в различных сечениях за счет использования различных типов ультразвуковых волн [6–10], применение головной волны

позволяет проводить структуроскопию в подповерхностном слое, игнорируя неровности поверхности [11].

### Расчет скорости головной волны

Для возбуждения головной волны в рельсах использовался ультразвуковой дефектоскоп DIO 1000PA (табл. 1) и блок ультразвуковых преобразователей с переменным углом ввода П131-2,5МГц-0...90 (табл. 2).

**Таблица 1. Характеристики дефектоскопа DIO 1000PA**

| Технические характеристики                             | STARMANS DIO 1000PA       |
|--|---------------------------|
| Диапазон устанавливаемых скоростей ультразвука в стали | 100–15240 м/с             |
| Рабочие частоты  | 0,5 –15 МГц               |
| Задержка   | от –10 до 4800 мс         |
| Частота дискретизации                                  | 204,8 МГц                 |
| Глубина (амплитуда) ВРЧ (динамический диапазон)        | 111 дБ (71 дБ непрерывно) |
| Диапазон углов для поперечных волн                     | 0–89°                     |
| Встроенная память:                                     | 16 ГБ                     |

**Таблица 2. Характеристики ультразвукового преобразователя с переменным углом ввода П131-2,5МГц-0...90**

| Характеристика                                    | Обозначения  | Величина | Единица измерения |
|---|--------------|----------|-------------------|
| Угол падения на плоскость раздела сред            | $\alpha$     | 0...64   | градус            |
| Рабочая частота                                   | $f$          | 2,5      | МГц               |
| Время в призме при угле падения $\alpha=27^\circ$ | $t$          | 8,72     | мкс               |
| Размер пьезопластины                              | $a \times b$ | 16×12    | мм                |
| Добротность преобразователя                       | $Q$          | 5        | –                 |
| Габаритные размеры                                |              | 80×35×16 | мм                |

Схема проведения измерений приведена на рис. 1.

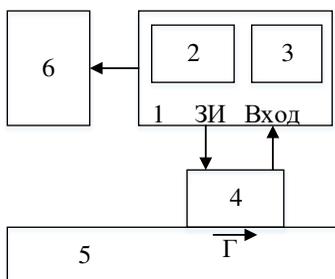


Рис. 1 Блок-схема установки для измерения скорости головной волны: 1 – ультразвуковой дефектоскоп; 2 – дисплей дефектоскопа; 3 – панель управления дефектоскопа; 4 – преобразователь головной волны; 5 – объект контроля; 6 – компьютер; Г – головная волна

Для того чтобы отстроиться от времени задержки ультразвуковой волны в призме преобразователя, при расчете скорости головной волны вычислялась задержка между временем распространения головной волны в нагружаемом рельсе и в СО-2.

Скорость головной волны в СО-2  $C_{CO-2} = 5900$  м/с. Зная базу преобразователя  $b = 0,062$  м при угле падения луча из призмы преобразователя на плоскость раздела сред призма-объект контроля, равном  $27^\circ$ , и таком же угле приема, можно вычислить время распространения головной волны  $t_{CO-2}$  в СО-2.

Результаты измерений, сохраненные в текстовых файлах, для стандартного образца СО-2 и для объекта контроля обрабатываются в программной среде MathCAD. С помощью функции интерполяции частота дискретизации сигналов изменяется с 204,8 МГц до 1024 МГц. С помощью функции взаимной корреляции вычисляется задержка  $\Delta t$  между временем распространения подповерхностной волны в объекте контроля и образце СО-2.

Таким образом, скорость головной волны в исследуемом объекте рассчитывается по формуле

$$C_{\text{Гол}} = \frac{b}{(t_{CO-2} - \Delta t)}, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – разность времени прихода головной волны в рельсе и СО-2;  $t_{CO-2} = 5900$  м/с – время распространения головной волны в стандартном образце СО-2;  $C_{\text{Гол}}$  – скорость головной волны в образце,  $b$  – база преобразователя.

### Скорость головной волны в рельсах

Параметры исследуемых рельсов со сварным стыком приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры исследуемых рельсов типа Р65

| № | Длина, м | Износ по высоте, мм | Твердость поверхности катания, НВ | Твердость области сварного соединения, НВ | Ширина зоны сплавления, мм |
|---|----------|---------------------|-----------------------------------|---|----------------------------|
| 1 | 0,975    | 5,9...5,6           | 396±15                            | 331±15                                    | 50                         |
| 2 | 1,385    | 5,4...6,9           | 366±15                            | 325±15                                    | 40                         |
| 3 | 1,390    | 2,0...2,1           | 344±15                            | –   | –                          |

Блок ПЭП головной волны устанавливался на Рельс согласно рис. 2.

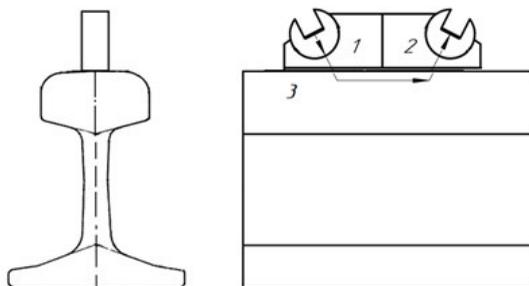


Рис. 2. Схема установки преобразователя головной волны на поверхность катания рельса: 1 – ПЭП-излучатель; 2 – ПЭП-приемник; 3 – рельс

Блок ПЭП перемещается вдоль оси рельса и через каждые 50 мм снимается сигнал головной волны вне зоны термического влияния при использовании электроконтактной сварки и через каждые 10 мм в зоне термического влияния используемой сварки.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные скорости распространения головной волны, распространяющейся вдоль поверхности катания в трех рельсах, в двух из которых (1 и 2) есть неразъемное соединение, выполненное электроконтактной сваркой оплавлением. Сварной стык на графике по оси  $L$  имеет координату 0,3 м.

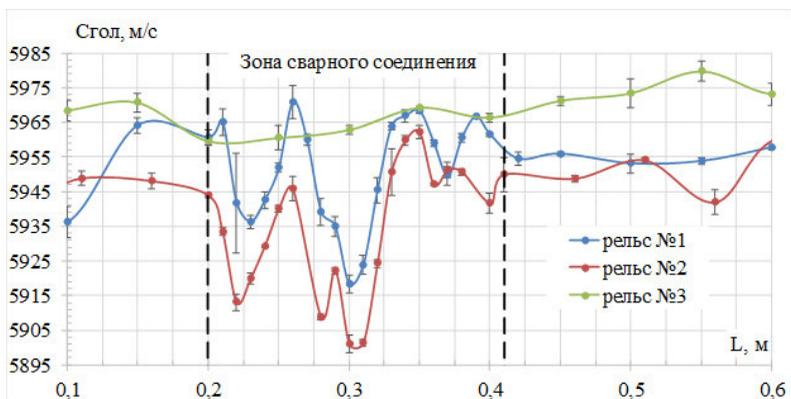


Рис. 3. Скорость головной волны в рельсах при прозвучивании с поверхности катания вдоль оси рельса, полученная раздельным преобразователем

На рис. 4 приведена корреляция скорости головной волны и твердости по Бринеллю в зоне сварного соединения рельсов. Твердость измерялась твредомером ТДМ-3 с шагом 5 мм в зоне сварного соединения.

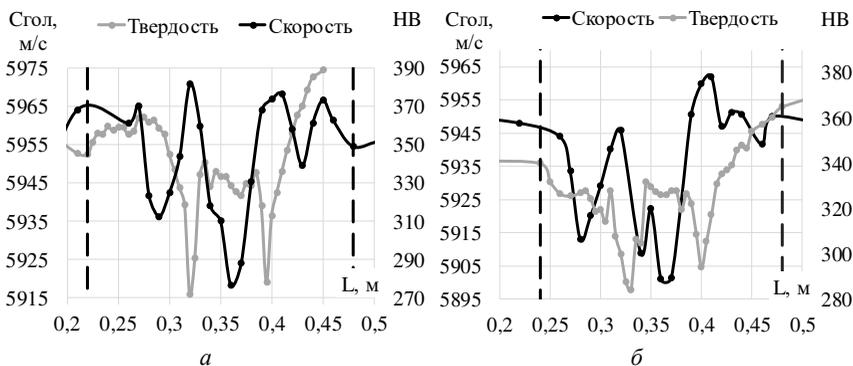


Рис. 4. Изменение скорости головной волны и твердости вдоль поверхности катания рельсов  $L$ :  $a$  – рельс № 1;  $b$  – рельс № 2. Пунктирными линиями указана зона сварного соединения, согласно меткам изготовителя

В месте сплавления, где скорость головной волны минимальна, твердость на 40...65 НВ меньше средней твердости поверхности катания рельсов. При удалении от центра сплавления на 0,03...0,04 м наблюдается минимум твердости и максимум скорости головной волны в зоне сварного соединения.

На зону сплавления рельса № 2 были подготовлены микрошлифы (рис. 5). Травление проводилось 4%-м раствором  $\text{HNO}_3$ .



Рис. 5. Микрошлиф зоны сплавления рельсов: *a* – образец 1; *б* – образец 2

На рис. 6 приведена микроструктура образца 1: *a* – светлая зона, *б* – темная зона, *в* – граница темной и светлой зон, *г* – переходная зона (зоны по рис. 5). Увеличение –  $\times 500$ .

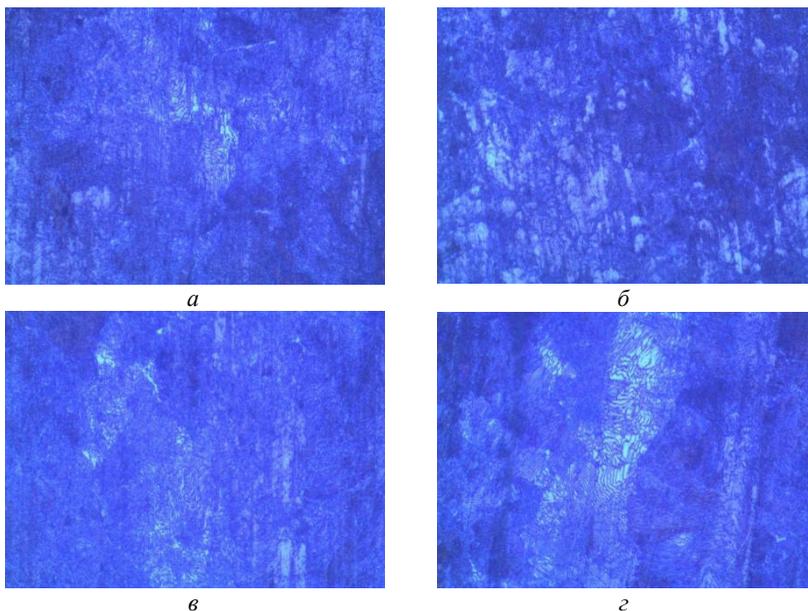


Рис. 6. Микроструктура зоны сплавления рельсов: пластинчатый перлит, увеличение –  $\times 500$ : *a* – светлая зона; *б* – темная зона; *в* – граница темной и светлой зон; *г* – переходная зона

Микроструктура образца 1: пластинчатый перлит.

На рис. 7 приведена микроструктура образца 2: *а* – светлая зона, *б* – темная зона, *в* – граница темной и светлой зон, *г* – переходная зона (зоны по рис. 5). Увеличение –  $\times 500$ .

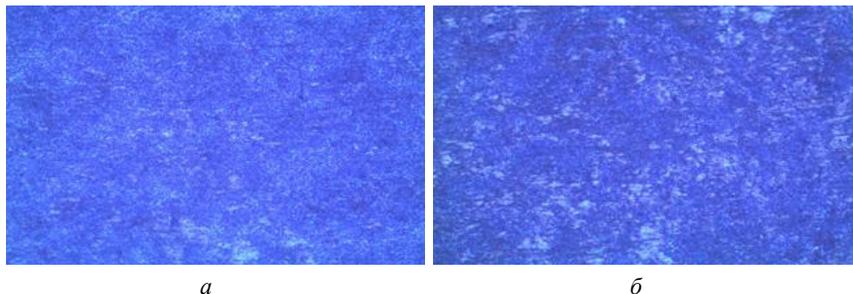


Рис. 7. Микроструктура зоны сплавления рельсов: пластинчатый перлит, увеличение –  $\times 500$ : *а* – светлая зона; *б* – темная зона

Микроструктура образца 2: сорбит.

Белые зоны на образцах 1 и 2 – зона сплавления.

Химический состав рельса № 2: содержание углерода – 0,71 %; содержание марганца – 0,85 %; содержание кремния – 0,26 %, фосфора – 0,011 %, серы – 0,022 %, никеля 0,03 %, хрома 0,03 %, меди – 0,03 %.

Химический состав установлен методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на спектрометре по ГОСТ Р 54153-2010.

### Выводы

В ходе работы была измерена скорость головной волны в рельсах на поверхности катания в зоне сварного соединения и в рельсе без сварного соединения. В рельсе с большим износом по высоте изменение скорости головной волны больше, что может говорить о большей степени деструктуризации металла сварного шва.

*Работа выполнена при поддержке гранта ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (проект №12.06.01/18МВВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308), ЦКП ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН».*

### Список литературы

1. СТО РЖД 1.08.002–2009. Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом. Технические условия. Введ. 2009-10-01. М. : Стандарт ОАО «РЖД», 2009. 41 с.
2. ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые; введ. 1988-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1991. 38 с.
3. *Николаев, Г. А.* Сварные конструкции. В 2 т. / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. М. : Высш. шк. Т. 1. 1982. 272 с. Т. 2. 1983. 344 с.
4. *Тихомирова, Л. Б.* Исследование структуры и механических свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов / Л. Б. Тихомирова, А. С. Ильиных, М. С. Галай, Э. С. Сидоров. Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2016. Т. 16, № 3. С. 90–95.
5. *Шур, Е. А.* Повреждения рельсов. М. : Интекст, 2012. 192 с.
6. *Недзвецкая, О. В.* Фильтрация акустических дефектограмм протяженных объектов с использованием метода обращения свертки сигналов // Интеллектуальные системы в производстве. 2006. № 2. С. 31–40.
7. *Муравьева, О. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. 2013. № 12. С. 69–76.
8. 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.
9. *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.
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. 13–23. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.
11. *Разыграев, Н. П.* Приемочный и эксплуатационный ультразвук контроль головными волнами эхо-методом / Н. П. Разыграев, А. Н. Разыграев // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 4 (38). С. 8–12.

S. V. Kazantsev<sup>1</sup>, master student

E-mail: sergokazancev@mail.ru

V. V. Muraviev<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor, head of chair

E-mail: pmkk@istu.ru

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>1,2</sup> Udmurt Federal Research Centre UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

## **Propagation of Ultrasonic Creep Wave in Rails with Welded Joint Made by Electrocontact Welding**

*The article presents experimental data on the velocity of the creep ultrasonic wave propagating in the segments of rails containing a welded joint made by electrocontact welding. The velocity of the creep ultrasonic wave decreases significantly at the junction of the rails has a peak increasing the distance from it. To excite the creep ultrasonic wave in the rails, an ultrasonic transducer with a variable input angle was used, designed for more active conversion of the creep ultrasonic wave and other types of waves.*

**Keywords:** creep ultrasonic wave, rail, welded seam, ultrasound velocity waves, destructurization

УДК 620.179.16

*О. В. Муравьева*<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, профессор

*А. В. Платунов*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

*Л. В. Волкова*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент

*Э. В. Павинев*<sup>1</sup>, магистрант

E-mail: uosp@mail.ru

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

### **О возможности ультразвукового контроля подошвы рельса многократным зеркально-теневым методом**

*Рассматривается метод контроля перьев подошвы, закрепленных в пути рельсов Р65, позволяющий производить поиск дефектов в недоступных для существующих способов диагностики зонах. Обоснован выбор параметров контроля, показана сходимостъ расчетных данных и экспериментальных результатов. Метод может дополнить существующие на сегодня варианты контроля, однако не может быть применен в области болтового соединения.*

**Ключевые слова:** ультразвуковой, параметры контроля, акустический тракт, искусственный дефект.

#### **Введение**

Повышение достоверности контроля, расширение контролируемых зон эксплуатируемых железнодорожных рельсов – актуальная задача в условиях повышения нагрузки на ось и увеличения скоростей движения. Для решения данной задачи необходима разработка способов контроля, ранее не доступных для диагностики зон, например, пера подошвы рельса. Поперечные усталостные трещины именно в этой зоне при значительных растягивающих нагрузках, возникающих в подошве при движении подвижного состава, являются крайне опасными.

Попытки разработки ультразвуковых способов контроля подошвы предпринимались и ранее, однако в силу недостатков так и не находили широкого применения. Среди работ в этой области следует отметить труды С. Л. Молоткова, А. А. Маркова, В. Ф. Тарабрина, Е. Г. Базулина [1–6]. При поиске решения задачи обнаружили проблемы: в одном случае выявлялись только дефекты, расположенные под областью шейки; в других существенным оказалось отсутствие прямого доступа к перьям подошвы из-за креплений к шпалам; неудовлетворительный

акустический контакт при установке преобразователя на поверхность катания головки, как правило, криволинейной формы и неравномерно изношенной; сложность расшифровки результатов.

В работе не рассматривается контроль центральной части подошвы, поскольку эта задача успешно решена с использованием зеркально-теневого метода (угол ввода  $0^\circ$  с поверхности катания) и эхо-метода (угол ввода  $45^\circ$  с поверхности катания) [7].

### Описание эксперимента

Представленный в работе способ можно отнести к многократному зеркально-теневого методу контроля и реализуется одним совмещенным пьезопреобразователем (ПЭП) с размещением на шейке рельса. Для выбора оптимальных параметров контроля подошвы построена серия геометрических моделей распространения ультразвуковой волны в перьях подошвы рельса Р65 с различными точкой и углами ввода. Способ с углом ввода  $58^\circ$  был выбран как наиболее подходящий (рис. 1).

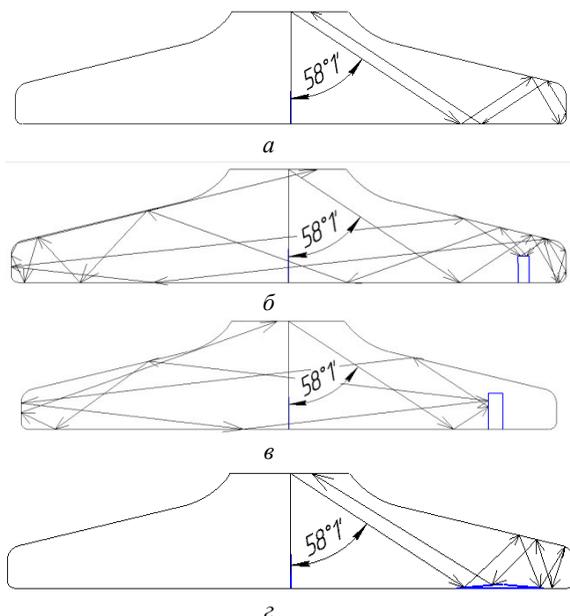


Рис. 1. Распространение поперечных волн в пере подошвы рельса Р65с углом ввода  $58^\circ$ : а – в бездефектном участке; б – при наличии дефекта диаметром 3,5 мм и глубиной 7 мм; в – при наличии дефекта диаметром 4 мм и глубиной 10 мм; г – при наличии продольного дефекта

При указанном параметре увеличение количества переотражений от дефектов различного типа, время распространения и расхождение, следовательно, и ослабление, оказались более выраженными.

Акустический тракт был восстановлен до точки ввода, расположенной на шейке рельса (рис. 2). С учетом угла раскрытия диаграммы около  $4,3^\circ$  для выбранного типа ПЭП построена зона прозвучивания (рис. 2, наклонная штриховка); вертикальной штриховкой отмечена зона прозвучивания прямыми преобразователями, установленными на поверхность катания рельса. Расчет показывает, что совокупность разрабатываемого и существующих методов способна охватить подошву полностью.

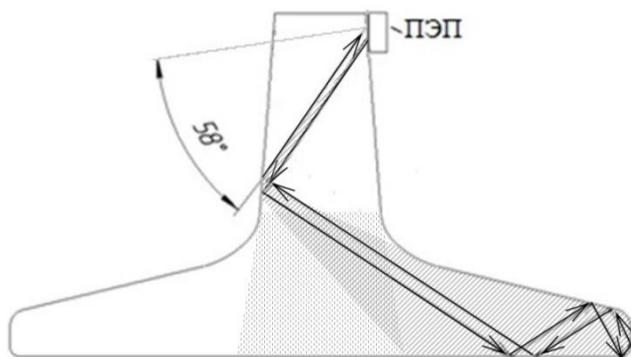


Рис. 2. Акустический тракт при контроле подошвы рельса Р65 при выбранном угле ввода  $58^\circ$  и зоны прозвучивания ПЭП с поверхности катания (вертикальная штриховка), с шейки рельса (наклонная штриховка)

Экспериментальное исследование проведено с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-70 «Луч». С помощью ПЭП с переменным углом ввода  $\alpha$ , рабочими частотами 1,8, 2,5, 5 МГц, было показано, что при  $\alpha = 58^\circ$  и рабочей частоте преобразователя 5 МГц получен наибольший коэффициент выявляемости  $N_o$  (рис. 3).

На полученной серии дефектограмм (рис. 4) можно наблюдать импульс многократно отраженного сигнала из пера подошвы. Амплитуда максимальна на бездефектном участке и снижается более чем в 2 раза на дефектных участках.

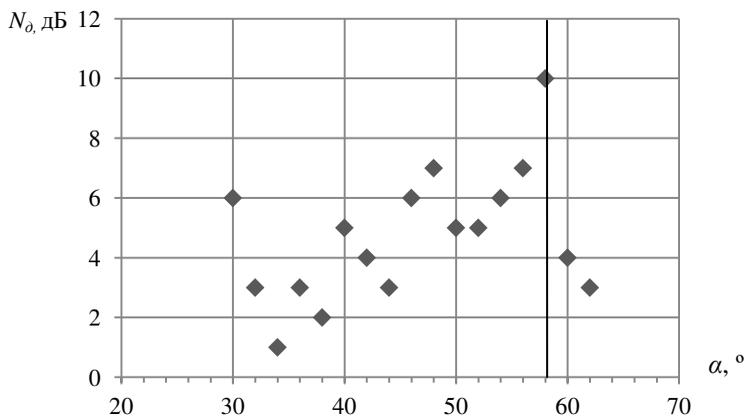


Рис. 3. Значение коэффициента выявляемости  $N_d$  при различных углах ввода волны

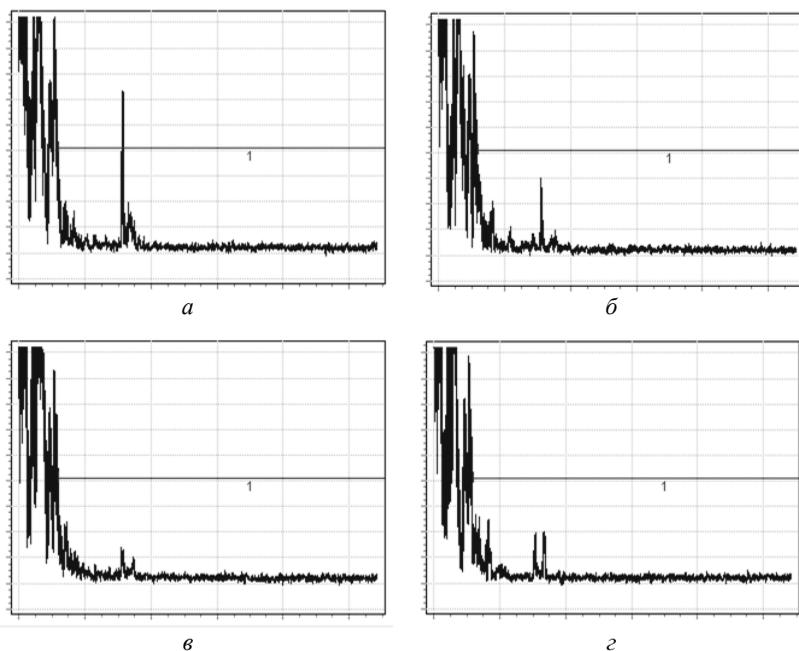


Рис. 4. А-развертка дефектоскопа при контроле подошвы рельса Р65: а – бездефектный участок; б – искусственный дефект – плоскодонное отверстие (ПДО) Ø3,5 мм глубиной 7 мм; в – ПДО Ø4 мм глубиной 10 мм; г – поперечный пропил глубиной 2 мм

## Выводы

С помощью геометрических построений и экспериментально подтверждена возможность контроля подошвы магистральных железнодорожных рельсов Р65 многократным зеркально-теневым методом. Обоснован выбор наклонных совмещенных преобразователей с рабочей частотой 5 МГц, углом ввода  $58^\circ$ , точки ввода луча. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможность обнаружения дефектов 60.2, 64.2, 65.2, 62.2 [8] подошвы рельсов Р65 в эксплуатации, ранее являющихся скрытыми; позволяют формулировать требования к оборудованию и организации контроля таких зон. Предлагаемый подход можно распространить на рельсы других типов после аналогичного приведенному расчету параметров контроля.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-6599.2018.8 с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308), ЦКП ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН».*

## Список литературы

1. Пат. 2441789 Российская Федерация. Способ оценки коррозионного повреждения подошвы рельса / Марков А. А.; опубл. 13.12.2015.
2. Пат. 2645818 Российская Федерация. Способ ультразвукового контроля подошвы рельсов / Молотков С. Л., Марков А. А.; опубл. 19.12.2016.
3. Пат. 173226 Российская Федерация. Способ ультразвукового контроля пера подошвы железнодорожных рельсов / Урбах В. И., Ильин В. А., Котляров М. Л., Козлов В. Б.; опубл. 07.05.1992.
4. Пат. 2433397 Российская Федерация. Способ сплошного ультразвукового контроля подошвы рельсов / Тарабрин В. Ф., Одынец С. А., Юрченко Е. В., Кононов Д. А., Чистякова О. Е., Анисимов В. В., Главатский Д. А., Зайцев С. А.; опубл. 10.11.2011.
5. Пат. №173226 Российская Федерация. Способ ультразвукового контроля пера подошвы железнодорожных рельсов / Урбах В. И., Ильин В. А., Котляров М. Л., Козлов В. Б.; опубл. 07.05.1992.
6. *Базулин, Е. Г.* Получение изображений дефектов в перьях подошвы рельсов методом SAFT с учетом многократного отражения ультразвукового импульса от границ объекта контроля. 2009. С. 64–76.
7. *Марков, А. А.* Дополнительный признак дефекта при ультразвуковом контроле рельсов / А. А. Марков, Е. А. Максимова // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 10. С. 2–8.
8. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов». Утверждена Распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 10.10.2017

№ 2053р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=610407#030250850644456473> (дата обращения: 28.06.2019).

*O. V. Muravieva*, DSc in engineering, professor

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

*L. V. Volkova*, CSc in engineering, associate professor

*E. V. Pavinev*, master student

E-mail: uosp@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **About the Possibility of Ultrasonic Testing of the Sole Rail by Multiple Mirror-Shadow Method**

*The method of ultrasonic testing of sole rail is present. The choice of ultrasonic testing parameters is substantiated, the convergence of experimental results with the model is shown, series of defectograms from defects of different types and sizes is derived.*

**Keywords:** ultrasonic testing settings, ultrasonic path, the artificial defect

УДК 53.088.7 + 534.631

С. А. Мурашов<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц/  
E-mail: sm-ii@yandex.ru

Е. П. Кузнецов<sup>2</sup>, канд. мед. наук, врач ультразвуковой диагностики

Д. С. Мурашова<sup>3</sup>, инженер

Е. С. Биринцева<sup>1</sup>, студент

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

<sup>2</sup>Городская клиническая больница № 2 Министерства здравоохранения  
Удмуртской Республики, Ижевск

<sup>3</sup>ООО «ИРЗ ТЕСТ», Ижевск

### **Методика повышения точности измерения виброскорости при выполнении вибрационной эластографии по изображениям, полученным в PW-режиме ультразвукового сканера**

*В статье изложена пошаговая методика повышения точности измерения виброскорости за счет обработки растровых изображений динамического спектра виброскорости, формируемых в PW-режиме ультразвуковых сканеров. Показано, что применение методов повышения точности необходимо для реализации методик вибрационной эластографии, основанных на использовании PW-режима, особенно при использовании источников вибрации малой мощности, при оценке степени фиброзного поражения печени по шкале METAVIR. Экспериментально показано, что разработанная методика позволяет повысить точность измерения виброскорости в слое мягкой биологической ткани (печень свиньи домашней in vitro), расположенном внутри желатинового фантома мягких тканей, в 7 и более раз.*

**Ключевые слова:** виброскорость, PW-режим, обработка изображений, эластография, виброэластография.

#### **Введение**

Под термином «эластография» понимаются различные методы оценки и визуализации упругих свойств мягких биологических тканей (далее – тканей). Исследования по использованию ультразвука в эластографии проводятся с 1970-х гг. [1], а сам термин введен в 1991 г. [2]. Начало ультразвуковым вибрационным методам эластографии положено в 1980-х гг. с развитием методов ультразвуковой доплерографии, использовавшейся для измерения скоростей движения тканей и их компонентов (сокращение сосудов, кровотоков и т. д.) и методов измерения механических смещений в биологических тканях. Так, в работах [3, 4] предложено использование эффекта Доплера для оценки упругих

свойств тканей, искусственно приводимых в движение низкочастотным источником вибрации (вибрационная эластография). Начиная с 2000-х гг. в ультразвуковой диагностической аппаратуре реализуются такие технологии динамической эластографии, как квазистатическая эластография, транзиентная эластография (воздействие на объект исследования источником внешней вибрации контролируемой величины, как и при вибрационной эластографии, но с регистрацией скорости сдвиговых волн) и ARFI-эластография (вместо внешнего источника вибрации используется сила радиационного давления, создаваемая внутри объекта исследования путем фокусировки УЗ-излучения, регистрация скорости сдвиговых волн – p-SWE- и SWE-методы) [1, 5].

Опции эластографии в УЗ-сканерах требуют наличия дополнительных аппаратных модулей, специализированных датчиков и высокой вычислительной мощности для обработки данных, что значительно повышает стоимость готовых решений. В настоящее время в эксплуатации находится обширный парк ультразвукового оборудования, не обладающего возможностями эластографии. В связи с этим сохраняется потребность в развитии дополнительных методов эластографии, совместимых с УЗ-сканерами, не имеющими специальной опции. Так, в работе [6] представлена модель визуализации виброскорости под действием внешних переменных механических напряжений при УЗ-доплерографии, а также даны рекомендации по выбору оптимальных значений этих напряжений для проведения эластографии на УЗ-сканерах в режиме доплеровского картирования. В работе [7] выполнена сравнительная оценка модулей упругости фантомов мягких тканей тремя методами УЗ-эластографии: статическим, вибрационным (измерение виброскорости в PW-режиме УЗ-сканера) и методом сдвиговых волн (SWE), показавшая необходимость повышения точности и достоверности измерений при использовании дополнительных методов эластографии.

В вибрационной эластографии используется связь модуля Юнга объекта исследования в выбранной его области с измеряемой виброскоростью в этой области. Для выработки требований к точности измерения виброскорости необходимо определить диапазон значений модуля Юнга объекта исследования. В УЗ-эластографии принята [8] следующая взаимосвязь значений модуля Юнга со стадиями поражения печени человека по METAVIR: 2,5–7 кПа – здоровая печень (F0) или ранняя стадия фиброза (F1), 7–9,5 кПа – значительный фиброз (F2), 9,5–12,5 кПа – острая форма фиброза (F3), свыше 12,5 кПа – цирроз (F4). Источник вибрации формирует механические колебания, передаваемые в объект исследования с поверхности, как правило, в пределах частотного диапазона 10 Гц – 1 кГц, а датчик УЗ-сканера излучает и принимает импуль-

сы частотой 2–5 МГц. Параметры передачи вибраций от источника в область измерения в объекте исследования зависят от технической реализации измерительной системы и особенностей объекта исследования и должны учитываться при вычислении значений модуля Юнга.

Виброскорость  $V$ , регистрируемая в процессе УЗ-доплерографии при гармоническом механическом воздействии, определяется [6] из соотношения:

$$V \approx 2,13\pi f C \frac{\sigma}{E f_{УЗ}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота механических колебаний, создаваемых источником вибрации;  $C \approx 1540$  м/с – скорость ультразвука в мягкой ткани;  $f_{УЗ}$  – рабочая частота УЗ-датчика;  $\sigma$  – амплитуда переменного механического напряжения, создаваемого источником вибрации в объекте исследования;  $E$  – модуль Юнга.

Например, если исключить из рассмотрения погрешности оценки  $C$ ,  $\sigma$  и  $f$ , то для измерения модуля Юнга с точностью  $\pm 0,5$  кПа виброскорость  $V$  должна быть измерена с погрешностью  $\Delta V = \pm 0,2$  м/с при  $f = 100$  Гц,  $\sigma = 300$  Па,  $f_{УЗ} = 2,5$  МГц. При увеличении амплитуды механических напряжений до 1 кПа минимально допустимая погрешность  $\Delta V$  пропорционально увеличивается до  $\pm 0,8$  м/с. При использовании сравнительно слабых источников вибрации, создающих давления  $\sigma < 500$  Па и работающих на частотах  $f < 100$  Гц, значения виброскорости оказываются весьма низкими и могут не превышать одного деления шкалы на экране УЗ-сканера, что повышает требования к точности измерений и обуславливает необходимость применения методов обработки изображений по большому числу точек в условиях пониженного разрешения.

### Описание эксперимента

Практический интерес представляет измерение виброскорости в мягких биологических тканях, приближенных по физиологическим и физическим свойствам к тканям и органам организма человека. Для проведения исследования *in vitro* изготовлен фантом мягкой биологической ткани, состоящий из слоя толщиной 1–3 см, представляющего собой печень свиньи домашней (*sus scrofa domesticus*), к которому сверху и снизу примыкают слои толщиной по 4–6 см, выполненные из перешедшего в твердое состояние раствора желатина с концентрацией 0,1 г/мл в воде. Неравномерная толщина слоев обусловлена сложной формой границы печень – желатин. Поверхности фантома гладкие. Зона интереса

при измерениях виброскорости ограничена выделенным на экране УЗ-сканера участком внутри среднего слоя.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

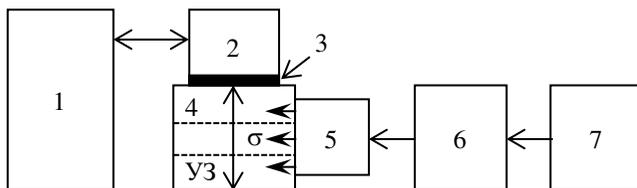


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – УЗ-сканер с поддержкой PW-режима; 2 – УЗ-датчик, излучающий и принимающий ультразвуковые импульсы (УЗ); 3 – контактная среда; 4 – исследуемый фантом; 5 – низкочастотный излучатель механических колебаний, создающих в объекте механическое напряжение  $\sigma$ ; 6 – усилитель мощности; 7 – низкочастотный генератор сигналов

Режим PW (pulse-wave Doppler – импульсно-волновой Допплер) достаточно распространен в современных УЗ-сканерах и позволяет выполнять измерения скоростей движущихся или колеблющихся структур в выбранной области на заданной глубине объекта исследования за счет излучения коротких серий («пачек») УЗ-импульсов и оценки величины доплеровского сдвига по частоте в соответствующих принятых УЗ-импульсах, отраженных от неоднородностей в исследуемых биологических средах [3, 9]. Измерения отображаются в виде временной развертки изменения мгновенных спектров скоростей: значения скорости откладываются на оси ординат, а уровни спектра – в виде яркости соответствующих точек раstra.

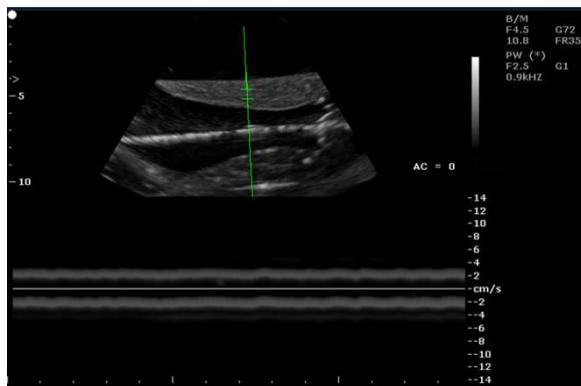


Рис. 2. Изображение на экране УЗ-сканера EDAN U50 при работе в PW-режиме

Типичное изображение, формируемое УЗ-сканером, работающим в PW-режиме, представлено на рис. 2, где в верхней части экрана отображается В-развертка с изображением фантома в секущей плоскости. На этом изображении требуется выделить область для измерения виброскорости (участок на слое печени). В нижней части экрана отображается спектрограмма виброскорости – диаграмма изменения распределения виброскоростей во времени, при идеальных условиях симметричная относительно линии 0 см/с.

Яркость, ширина, количество линий и смещение нулевого уровня (в рассматриваемом эксперименте достигающее  $\pm 0,5$  см/с) на спектрограмме виброскорости зависят от ряда факторов, таких как параметры настройки блоков усиления и постобработки сигнала, качество акустических контактов УЗ-преобразователя с объектом исследования и объекта исследования с источником вибрации, отклонение ориентации УЗ-преобразователя от нормали к поверхности ввода.

В ходе эксперимента зарегистрированы изображения спектрограмм виброскорости при различных частотах источника вибрации в диапазоне от 30 до 200 Гц.

В интерфейсе УЗ-сканеров предусматривается возможность отметки интересующих точек на спектрограмме с помощью курсора крестовидной формы и отображения соответствующих численных значений виброскорости. Теоретически такой метод измерения обладает погрешностью, определяемой одним пикселем изображения (в данном эксперименте  $\pm 0,05$  см/с). На практике же визуально сложно выделить максимумы на полосах спектра, сами полосы при достаточном уровне яркости имеют ширину, эквивалентную 1 см/с и более, а позиционирование курсора выполняется с промахом в 2–3 пикселя. Таким образом, без дополнительной обработки регистрируемых данных инструментальная погрешность составляет не менее  $\pm 0,5$  см/с.

### **Методика повышения точности измерения виброскорости**

В основе методики лежит обработка серошкальных цифровых или оцифрованных аналоговых изображений спектрограмм виброскорости, полученных на УЗ-сканере. При разработке методики авторы использовали возможности математического ПО Mathcad. Суть обработки заключается в выделении нескольких участков спектрограммы, нахождении пар первых максимумов в спектре виброскорости (пара образуется за счет использования как положительной, так и отрицательной области значений виброскорости) для каждого участка, выравнивании этих пар относительно уровня 0 см/с, отбрасывании недоверенных участков и усреднении результата по достоверным участкам.

Для корректного использования методики необходимо предварительно настроить УЗ-сканер таким образом, чтобы уровень регистрируемого сигнала был достаточно большим для появления спектрограммы на экране и в то же время не попадал в ограничение, в противном случае нахождение максимумов в спектре будет затруднено (а также потребуются применение более сложного алгоритма для восстановления формы спектра).

Обработка изображения включает несколько последовательных этапов.

1. Обрезка изображения или установка границ прямоугольной области, содержащей только спектрограмму и шкалу виброскорости.

2. Определение среднего количества пикселей между делениями шкалы виброскорости. Выполняется путем выбора вертикальной линии на изображении, которая проходит через все деления шкалы и не содержит других ярких элементов. По пиковым значениям яркости на этой линии автоматически определяются порядковые номера пикселей, соответствующие первому  $k_1$  и последнему  $k_n$  найденному делению, а также подсчитывается количество делений  $j$ . Для поддержки изображений, полученных от аналоговых источников, деления обнаруживаются как локальные максимумы яркостью не менее 50 % от максимального значения. Таким образом, среднее количество пикселей, соответствующих одному делению шкалы, равно

$$p = \frac{k_j - k_1}{j - 1}. \quad (1)$$

Величина  $p$  является осредненной по всем делениям шкалы, что позволяет нивелировать влияние погрешности дискретизации, возникающей при выводе на экран рисунок делений.

3. Определение величины виброскорости  $V_{1px}$ , соответствующей одному пикселю. Если известна цена деления виброскорости  $C_V$  на экране (в рассматриваемом эксперименте она равна 2), то:

$$V_{1px} = \frac{C_V}{p}. \quad (2)$$

4. Выбор областей спектрограммы для анализа. В процессе измерений необходимо стремиться к получению ровной и непрерывной формы сигнала, но во многих случаях, особенно при исследованиях *in vivo*, обеспечить стабильность сигнала на временных интервалах, превышающих время заполнения экрана сигналом по горизонтали, затруднительно. Для последующего анализа необходимо выделить наиболее дос-

товерные фрагменты сигнала (рис. 3), при этом рекомендуется захватить максимально возможное количество отсчетов сигнала для статистической обработки на завершающих этапах. Все выделенные вертикальные линии, соответствующие выбранным временным интервалам и отдельным отсчетам сигнала (интервалам шириной в один пиксель) и содержащие мгновенные спектры виброскорости, помещаются в отдельный массив (матрицу).

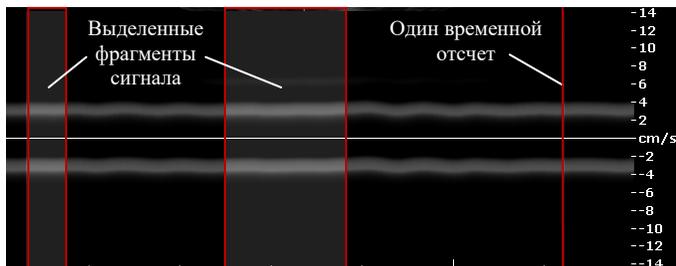


Рис. 3. Выбор фрагментов сигнала для анализа в виде временных интервалов или отдельных отсчетов сигнала

5. Определение номера точки по вертикали  $L_0$ , соответствующей нулевому значению виброскорости. Выполняется автоматически путем поиска горизонтальной тонкой непрерывной линии с минимальными отклонениями по яркости или задается вручную.

6. Расчет вектора значений виброскорости  $S$  выполняется для каждой точки  $i$  спектра по формуле

$$S_i = (i + y_{\min} - L_0) \cdot V_{1px}, \quad i = 0 \dots y_{\max} - y_{\min}, \quad (3)$$

где  $y_{\min}$  и  $y_{\max}$  – номера крайних, соответственно, нижней и верхней точек изображения, определенные на этапе 1 или впоследствии уточненные. Точки на спектрограмме, соответствующие осевой горизонтальной линии на изображении, а также другие элементы изображения, не относящиеся к спектру, должны быть обнулены.

7. Поиск пар максимумов  $V_{\max1}$  и  $V_{\max2}$ , расположенных по разные стороны от нулевого значения виброскорости на мгновенном спектре (характерная форма которого представлена на рис. 4), для каждого временного отсчета, входящего в выбранные для анализа фрагменты сигнала. В спектре могут присутствовать дополнительные составляющие, меньшие по уровню, максимумы которых соответствуют кратным значениям виброскорости. Эти составляющие не должны определяться как значения  $V_{\max1}$  и  $V_{\max2}$ .

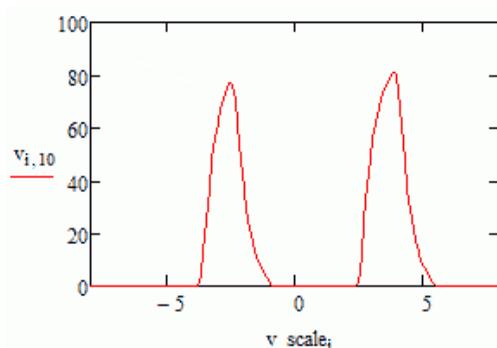


Рис. 4. Мгновенный спектр виброскорости: по оси абсцисс отложена виброскорость (см/с), по оси ординат – значения яркости пикселей; 1 и 2 – максимумы спектра, в которых необходимо определить значения виброскорости

8. Расчет значения виброскорости  $V$  для каждой точки исследуемых фрагментов сигнала с устранением «дрейфа нуля» производится по формуле:

$$V = \frac{|V_{\max 1}| + |V_{\max 2}|}{2}. \quad (4)$$

9. Построение диаграммы виброскорости  $V$  в зависимости от номера отсчета в совокупности исследуемых фрагментов сигнала (рис. 5). Обеспечение возможности удаления из совокупности тех отсчетов, в которых получаемые значения виброскорости представляются исследователю недостоверными (например, хорошо различимые локальные области, в которых наблюдается существенное отклонение виброскорости от основной части диаграммы). На этом шаге при высоком качестве исходного сигнала можно обеспечить погрешность измерения, не превышающую погрешность, обусловленную пикселизацией изображения. Так, для сигнала, показанного на рис. 3, один пиксель по вертикали на изображении соответствует изменению виброскорости на 0,112 см/с. По результатам обработки, представленным на рис. 5, после исключения областей 1 и 2 можно определить, что значение виброскорости находится в пределах интервала от 2,8 до 2,856 см/с.

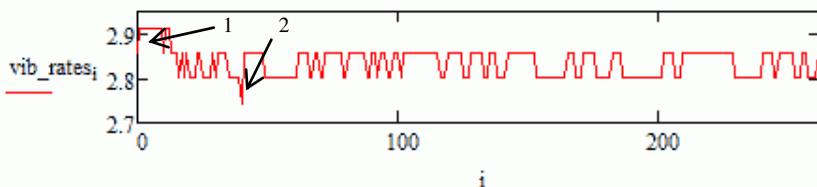


Рис. 5. Значения виброскорости, см/с, полученные для отсчетов сигнала  $i$ : 1, 2 – локальные области данных, которые представляются недостоверными

10. Расчет среднего значения виброскорости (математического ожидания) по массиву значений «достоверного» фрагмента сигнала, оценка доверительного интервала. Для фрагмента данных, представленного на рис. 5, математическое ожидание для виброскорости составляет 2,83 см/с, доверительный интервал  $\pm 0,03$  см/с.

### Результаты и их обсуждение

Разработанная методика повышения точности измерения виброскорости  $V$  использована при анализе набора изображений спектрограмм виброскорости при различных частотах  $f$  источника вибрации в диапазоне от 30 до 200 Гц, зарегистрированных в ходе эксперимента. Полученная экспериментальная зависимость  $V$  от  $f$  показана на рис. 6 крестиками. Отклонения от линейной аппроксимации экспериментальных данных (сплошная линия) не превышают 0,07 см/с в абсолютных значениях и 2,4 % в относительных в наихудшем случае; среднеквадратичное отклонение погрешностей составляет 0,02 см/с. Это на один порядок ниже, чем при ошибках измерения в «ручном» режиме.

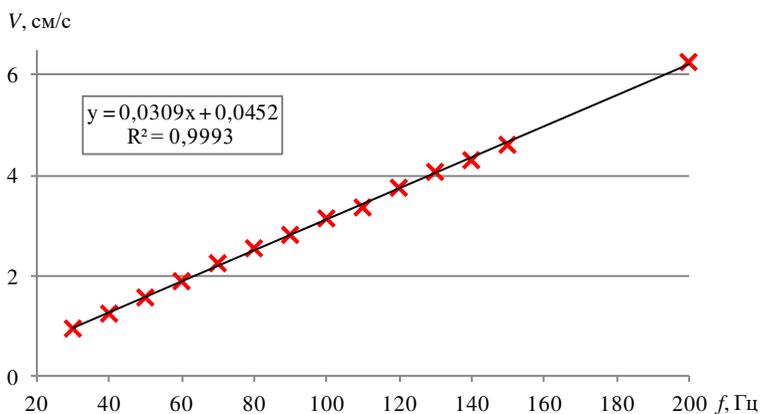


Рис. 6. Экспериментальная зависимость виброскорости  $V$  от частоты источника вибрации  $f$ , измеренная в желатиновом фантоме и оцененная по разработанной методике (крестики – экспериментальные точки, сплошная линия – линейная аппроксимация по всем точкам)

## Выводы

Разработанная методика повышения точности измерения виброскорости применима при выполнении вибрационной эластографии и других видов исследований по растровым изображениям, полученным в RW-режиме типовых ультразвуковых сканеров. Методика обеспечивает эффективное устранение смещений нулевого уровня сигнала, позволяет существенно повысить точность и достоверность определения максимумов мгновенного спектра виброскорости по сравнению с визуальным методом, устраняя случайные погрешности ручных измерений, осреднить результаты измерений по большому массиву значений. В то же время методика не позволяет в полной мере избавиться от приборной погрешности, а также от погрешностей дискретизации, возникающих при формировании растрового изображения.

Экспериментально полученная точность единичного измерения виброскорости в желатиновом фантоме с использованием разработанной методики составила в наихудшем случае 0,07 см/с, при этом среднеквадратичное отклонение ошибок составило 0,02 см/с. Таким образом, точность повышается не менее чем в 7 раз по сравнению с измерениями путем проставления отметок на спектре, отображаемом непосредственно на экране УЗ-сканера.

Повышение точности и надежности измерения виброрекорности необходимо для разработки эффективных методик виброэластографии, основанных на использовании РW-режима УЗ-сканеров.

Разработанная методика и программное обеспечение могут найти практическое применение при обработке экспериментальных данных для оценки качества и отбора наиболее достоверных спектрограмм виброрекорности.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» (проект №12.06.01/18МОВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий (рег. номер: 586308).*

### Список литературы

1. *Shina, T.* WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 1: Basic principles and terminology / T. Shina, K. R. Nightingale, M. L. Palmeri, T. J. Hall, J. C. Bamber et al. // *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2015, vol. 41, no. 5, pp. 1126-1147. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2015.03.009.
2. *Ophir, J.* Elastography: a quantitative method for imaging the elasticity of biological tissues / J. Ophir, I. Céspedes, H. Ponnekanti, Y. Yazdi, X. Li // *Ultrasonic Imaging*, 1991, vol. 13, pp. 111-134. DOI: 10.1177/016173469101300201.
3. *Krouskop, T. A.* A pulsed Doppler ultrasonic system for making noninvasive measurements of the mechanical properties of soft tissue / T. A. Krouskop, D. R. Dougherty, F. S. Vinson // *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1987, vol. 24, no. 2, pp. 1-8. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d48e/f67f6955edc56ce968fd3bed9e5b4d0a5696.pdf>
4. *Yamakoshi, Y.* Ultrasonic imaging of the internal vibration of soft tissue under forced vibration / Y. Yamakoshi, J. Sato, T. Sato // *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, vol. 84, pp. 139. DOI: 10.1121/1.2025806.
5. *Ferraioli, G.* Liver ultrasound elastography: an update to the World Federation for Ultrasound in Medicine and Biology Guidelines and Recommendations / G. Ferraioli, V. W.-S. Wong, L. Castera, A. Berzigotti, I. Sporea et al. // *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2018, vol. 44, no. 12, pp. 2419-2440. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2018.07.008.
6. Разработка методики оценки упругих свойств среды с использованием ультразвуковой доплерографии / О. В. Коробейникова, Е. П. Кузнецов, О. П. Богдан, Е. А. Фостик // *Вестник ИжГТУ*. 2010. № 2 (46). С. 97-100.
7. *Murashova, D. S.* Elasticity moduli estimation using different elastography methods: a phantom based approach / D. S. Murashova, S. A. Murashov, O. P. Bogdan, O. V. Muravieva, E. P. Kuznetsov, S. O. Yugova // *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications – 2015 (November 25-27, 2015, Izhevsk, Russia)*. Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2016. Pp. 136-142.

8. Ferraioli, G. WFUMB guidelines and recommendations for clinical use of ultrasound elastography: Part 3: Liver / G. Ferraioli, C. Filice, L. Castera, B. I. Choi, I. Sporea // *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2015, vol. 41, no. 5, pp. 1161-1179.

9. Осипов, Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы: режимы, методы и технологии. М. : ООО ПКФ «ИзоМед», 2011. 316 с.

S. A. Murashov<sup>1</sup>, CSc in engineering, associate professor

E-mail: sm-ii@yandex.ru

E. P. Kuznetsov<sup>2</sup>, CSc in medicine, doctor of ultrasonic diagnostics

D. S. Murashova<sup>3</sup>, engineer

E. S. Biringseva<sup>1</sup>, student

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University

<sup>2</sup> City clinical hospital No. 2 of the Ministry of health of the Udmurt Republic

<sup>3</sup> ООО "IRZ TEST"

Izhevsk, Russian Federation

### **Method for Increasing the Accuracy of Vibration Rate Measurement during Vibration Elastography by Processing of Images Acquired in PW-mode of Ultrasonic Scanner**

*The article presents step-by-step methodology to improve the accuracy of vibration rate measurement by processing of the vibration rate dynamic spectrum images generated in PW-mode of ultrasound scanners. It is shown that applying of methods for increasing the accuracy is essential for implementation of vibration elastography methods based on the use of PW-mode, especially when using a vibration sources of a small power, when evaluating the degree of fibrous lesions of the liver according to the METAVIR scale. It is shown experimentally that the developed technique allows to increase the accuracy of measurements of vibration rate in a layer of soft biological tissue (pig liver in vitro), located inside the soft tissue gelatin phantom, by 7 or more times.*

**Keywords:** vibration rate, PW-mode, image processing, elastography, vibration elastography.

УДК 628.196

*Ю. Г. Подкин, д-р техн. наук, проф.*

Сарапульский политехнический институт (филиал)

Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

### **Требования к построению системы экологического мониторинга вод пресных водоемов и раннего предупреждения о их загрязнении**

*Рассмотрена возможность построения системы экологического мониторинга пресноводных источников на основе измерения диэлектрических величин. Показано, что при сбросе загрязнений в процессе установления равновесия происходит технически различимое изменение составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, позволяющее установить факт загрязнения и дать качественную оценку экологической патологии. Разработан алгоритм экологического мониторинга, позволяющий формировать сигналы раннего предупреждения о чрезвычайной ситуации.*

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, пресные воды, экология воды, скачок диэлектрической проницаемости.

В настоящее время нет единого подхода к оценке экологии пресных водоемов. Разногласия возникают уже на концептуальном уровне. В России они дополняются проблемами межведомственного взаимодействия. Контрольные функции сосредоточены в природоохранных структурах, а аварийные ситуации устраняются в первую очередь силами МЧС.

Пока в стране и мире интенсивно развиваются только гидробиологический и физико-химический методы контроля, наиболее объективно и полно отражающие экологическое неблагополучие. Ценность этих методов состоит в том, что они позволяют устанавливать допустимые уровни разнообразных воздействий для биотической части реальных экосистем. Но поскольку в мировой практике экологического контроля эти методы не узаконены как экспертные, они могут применяться преимущественно как высокоинформативные, но частные методики или как базовые методы для создания национальных стандартов. Кроме того, их реализация требует применения оборудования, трудно сопрягаемого со средствами автоматизации. Поэтому, несмотря на высокую информативность и экологическую толерантность, эти методы не могут

использоваться для построения систем раннего предупреждения о экологическом неблагополучии.

Оперативность выявления аварийной ситуации можно значительно повысить, если перейти к физическим системам экологического контроля. Такой контроль базируется на фиксации отклонений физических характеристик природных вод от равновесных значений, вызванных разнообразными воздействиями, в том числе и загрязнениями различного генезиса. В качестве информативных выбираются такие физические характеристики водной среды, которые наиболее чувствительны к широко распространенным воздействиям и легко адаптируются к электронным средствам обработки информации.

Одним из наиболее эффективных по информативным и конструктивным критериям является диэлектрический контроль, основанный на анализе в переходном состоянии кинетики изменений вещественной  $\varepsilon'$  и мнимой  $\varepsilon''$  составляющих комплексной диэлектрической проницаемости среды и связанного с ними тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ . Анализ проводится с использованием временной или частотной спектроскопии [2–5]. Равновесное состояние природной водной среды характеризуется постоянством диэлектрических спектров. Климатические воздействия и сезонные изменения отражаются растянутыми во времени стабильными по знаку и диапазонам сдвигами диэлектрических величин в параметрически инвариантные состояния. И только импульсные и скачкообразные энергетические воздействия и (или) изменения химического состава, вызванные сбросами загрязнений различного генезиса, переводят водную среду в неравновесное состояние [6]. Реакция на такие воздействия во время переходных процессов зависит от соотношения начальных и конечных диэлектрических величин водной среды и загрязнителя.

В большинстве природных источников вода представляет слабоконцентрированный раствор электролитов, к которому применима статистическая теория слабых растворов Дебая – Хюккеля [1]. Вещественная составляющая комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon'$  испытывает частотную дисперсию в интервале частот  $0,1 \dots 1$  ГГц и за его пределами, по крайней мере, в теории, должна быть постоянной с низкочастотным значением около 78 и эффективным высокочастотным значением в оптическом диапазоне приблизительно 6 единиц [1]. Значения  $\varepsilon''$  и  $\operatorname{tg} \delta$  на низких частотах определяются только сквозной проводимостью, связанной, прежде всего, с ион-ионным и ион-дипольным взаимодействиями и вплоть до области дисперсии не должны зависеть от частоты. В высокочастотном и оптическом диапазонах диэлектриче-

ские потери возрастают в основном за счет релаксационной поляризации и потерь на излучение.

Основным загрязнителем можно считать сточные воды. Вводя диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_{\text{загр}}$ ,  $\epsilon_{\text{в}}$  и удельную проводимость  $\sigma_{\text{загр}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$  загрязнителя и воды, абстрагируясь от генезиса и возможности протекания химических реакций, рассмотрим характер переходных процессов в следующих моделях экологической патологии:

$$1 \quad \epsilon_{\text{загр}} \approx \epsilon_{\text{в}}; \quad \sigma_{\text{загр}} \approx \sigma_{\text{в}};$$

$$2 \quad \epsilon_{\text{загр}} < \epsilon_{\text{в}}; \quad \sigma_{\text{загр}} < \sigma_{\text{в}};$$

$$3 \quad \epsilon_{\text{загр}} \approx \epsilon_{\text{в}}; \quad \sigma_{\text{загр}} > \sigma_{\text{в}}.$$

В первом и втором случае вброс загрязнителя приведет к монотонному изменению диэлектрических величин до значений, определяемых законами смешения. Отличия вариантов лишь в направлении изменений и интенсивности переходных процессов. Полярные загрязнители с малыми удельными потерями – спирты, растворимые полимеры и другие – вызывают монотонное изменение  $\Delta\epsilon'$ , знак которого определяется разностью между диэлектрическими проницаемостями среды и загрязнителя и законами смешения, а  $\epsilon''$  – при малых концентрациях загрязнителя инвариантен к нему. Неполярные растворимые загрязнители, например диоксан, приводят к монотонному снижению ( $-\Delta\epsilon'$ ) и  $\epsilon''$ , нерастворимые – к образованию эмульсий с возможностью немонотонного снижения ( $-\Delta\epsilon'$ ) и  $\epsilon''$  из-за релаксационной поляризации коллоидной системы и смещения дисперсионной области.

Существенно отличается третий вариант. В этом случае различаются ионный состав исходных и конечного продуктов и характер ион-ионного и ион-дипольного взаимодействия. В результате возникают немонотонные изменения вещественной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  составляющих диэлектрической проницаемости среды (обратимые скачки), интенсивность которых определяется градиентами воздействий [6–9]. В качестве примера на рис. 1 показано относительное изменение вещественной и абсолютное – мнимой составляющих комплексной диэлектрической проницаемости водной среды в процессе разбавления 0,1 % раствора LiCl дистиллированной водой до концентрации раствора 0,03 %. В наблюдаемом процессе скачок по  $\epsilon'$  был колебательным обратимым. По мнимой составляющей также немонотонно устанавливалась концентрация раствора с высоким фактором диэлектрических потерь. Исследования, проведенные разными авторами, показали, что подобные однократные и многократные скачки диэлектрических характеристик наблюдаются при разбавлении любых концентрированных сред, сопровождающемся изменением ионно-дипольного состава ко-

нечного продукта [7–9]. Главная особенность этой реакции состоит в том, что диэлектрические характеристики водной среды весьма чувствительны даже к незначительным концентрациям загрязнителей, что и позволяет использовать диэлектрические измерения как высокочувствительный способ контроля экологического состояния среды.

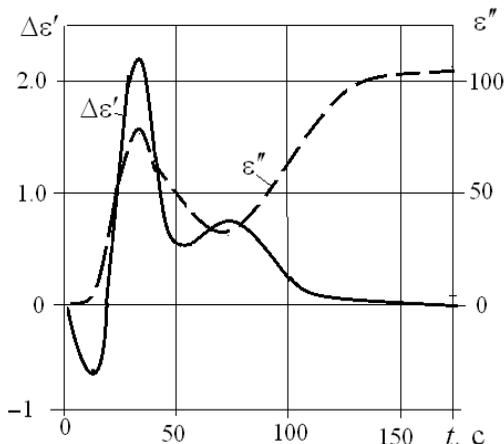


Рис. 1. Переходные диэлектрические характеристики в процессе разбавления слабоконцентрированного (0,1 %) раствора LiCl дистиллированной водой, для которой  $\epsilon' = 78,4$

В целом рассмотренные явления свидетельствует о принципиальной возможности диэлькометрического контроля изменения показателей качества водных растворов при массопереносе путем измерения  $\Delta\epsilon'$ , а также степени завершенности последнего процесса путем сопоставления  $\Delta\epsilon'$  и  $\epsilon''$ , из которых первое после окончания переноса растворимых компонентов снижается до минимума, определяемого законами смешения, а вторая достигает максимума.

Отличительная особенность переходных процессов диэлектрических величин – их сильная зависимость от основных влияющих факторов. К ним относятся химический состав и концентрации загрязнителя и природной воды, диапазон рабочих частот первичного измерительного преобразователя (ПИП), температура исходных компонентов и смеси [6–9]. Кроме того, переходные характеристики  $\epsilon'(t)$  и  $\epsilon''(t)$  ортогональны, поэтому применимость любых измерительных преобразователей сильно зависит от тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = \epsilon''(t)/\epsilon'(t)$  объекта контроля. Поскольку  $\epsilon''$  и  $\text{tg}\delta$  частотозависимы, выбор рабочих

частот системы контроля имеет принципиальное значение. Однако экспериментальные исследования с применением частотной и временной спектроскопии дают существенно отличные результаты, в том числе и противоречащие прямым методам измерения. Наиболее достоверны данные, полученные на фиксированной частоте в коротковолновом радиочастотном диапазоне. На частоте 10 МГц  $\epsilon'$  всеми средствами измерения [2–5] фиксируется на уровне  $78 \pm 0,5$  единиц. Для большинства природных пресноводных источников  $\epsilon''$  в зависимости от минерального состава лежит в диапазоне 0,1...100 единиц. В этом случае для измерения диэлектрических величин можно использовать емкостные первичные измерительные преобразователи (ПИП) с сосредоточенным или распределенным полем, а в качестве вторичного прибора – измерители имитанса, например, измерители параметров составляющих *CG*-двухполосников. Соответственно, необходимы измерительные преобразователи с рабочим диапазоном  $\text{tg}\delta$  от 0,01 до 10. Отмеченные диапазоны величин и условия их определения вполне доступны, но реализованы в весьма ограниченной номенклатуре приборов. В основном применяются более низкочастотные, ограниченные по  $\text{tg}\delta < 1$  измерители параметров *CG*-двухполосников, что связано с тем, что при больших  $\text{tg}\delta$  сигнал  $\epsilon'$  подавляется более мощным сигналом диэлектрических потерь. Кроме того, для обеспечения высокой разрешающей способности системы мониторинга ее пороговая чувствительность должна быть минимизирована по критериям обеспечения фиксации загрязнений, превышающих предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ (ПДК). А поскольку эти диапазоны концентраций весьма обширны, ориентироваться следует на минимально реализуемый порог фиксации хотя бы по одному диэлектрическому параметру. Вместе с тем система раннего предупреждения только фиксирует факт и начальный момент возникновения аварийной ситуации и тем самым создает предпосылки для форсированного принятия мер. При известном уровне техники теоретически возможно построение системы экологического контроля на основе фиксации отклонений физических параметров среды от равновесных значений с чувствительностью по каждой величине 0,5–1 %/час от равновесного значения, что с вероятностью до 70 % достаточно для выявления экологических рисков. А детальный анализ причин проводится традиционными методами селективной идентификации, что несколько снижает требования к организации мониторинга.

Первичные и вторичные измерительные преобразователи должны размещаться в географических точках наиболее вероятного загрязнения природных вод: устьях рек, местах слива сточных и очищенных вод, местах, подверженных воздействию природных факторов. Информация

о нарушении техносферной безопасности должна оперативно передаваться в единый центр. Учитывая стандартные требования к системам дистанционного контроля, для построения системы мониторинга вод пресных водоемов и раннего предупреждения об их загрязнении примем за основу следующие требования:

- минимизация порога чувствительности по диэлектрическим величинам;
- обеспечение высокой разрешающей способности по составляющим комплексной диэлектрической проницаемости;
- защита от помех и несанкционированных воздействий;
- формирование измерительной информации в диапазоне частот 5–20 МГц;
- обеспечение двусторонней связи с единым центром;
- антивандальная защита.

Четыре первых требования относятся к аппаратурной реализации системы. На сегодняшний день доступны для использования созданные заделы фундаментальных исследований акустических, оптических, кондуктометрических свойств пресных вод, но сведения о диэлектрических свойствах требуют существенной детализации. Известные методы и средства независимого измерения диэлектрических величин и составляющих проводимости СГ-двухполюсников активно совершенствуются, однако позволяют в заданных условиях достигать относительной чувствительности не лучше одного процента. Нужны новые виды первичных измерительных преобразователей физических свойств водных сред, которые могут быть использованы для контроля равновесного состояния природных и искусственных водоемов, систем холодного и горячего водоснабжения, как средства экспресс-контроля водосодержащих пищевых и сельскохозяйственных продуктов. Такие средства при использовании корреляционной обработки должны улучшить чувствительность до долей процента. Проводимые в этой области исследования позволяют создать научно-технический задел для повышения разрешающей способности физического контроля по видам загрязнений и снизить порог детектирования аварийных ситуаций до 0,1 % и повысить вероятность их выявления до 70–80 %.

Вместе с тем системные исследования методов физического экологического мониторинга пресноводных сред до сих пор не проводились ни в России, ни за рубежом. Имеются лишь частные наработки, не дающие целостной картины [9]. Поэтому необходимо полноценное проведение всего комплекса теоретических и экспериментальных исследований от фундаментальных до прикладных и создание на этой основе оригинальных методов и средств измерений с проверкой их примени-

мости для контроля выполнения требований ПДК и раннего экологического предупреждения об аварийной ситуации. Проведение таких исследований позволит расширить знания в области физики пресноводной гидросферы и теории электронных измерительных преобразователей физических свойств пресных вод.

Для обеспечения двусторонней связи может использоваться типовое сетевое оборудование, программное обеспечение связи и компьютерной обработки результатов.

### **Заключение**

Применение диэлектрического контроля, основанного на анализе в переходном состоянии кинетики изменений вещественной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  составляющих комплексной диэлектрической проницаемости среды, дает возможность создания принципиально новой технологии мониторинга и, соответственно, проектирования оборудования первичного измерительного преобразования. На этой основе возможно формирование единой системы раннего предупреждения об экологических чрезвычайных ситуациях и снижения влияния на экосистему природных и техногенных дестабилизирующих факторов. Система диэлектрического контроля создается как система раннего предупреждения об экологическом неблагополучии. Она ориентирована лишь на оперативное выявление отклонения диэлектрических свойств среды от равновесных значений, но не позволяет идентифицировать их причины. Поэтому не может рассматриваться как измерительная система.

### **Список литературы**

- 1 *Дамаскин, Б. Б.* Электрохимия / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. 2-е изд., испр. и перераб. М. : Химия : КолосС, 2006. 672 с.
- 2 *Вичкань, А. В.* Высокочастотная комплексная диэлектрическая проницаемость водных растворов солей / А. В. Вичкань, П. А. Мельяновский // Proc.12<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. Microwave & Telecom. Technol. (CriMiCo'2002). Pp. 542–543.
- 3 *Лилеев, А. С.* Диэлектрическая релаксация и молекулярно-кинетическое состояние воды в растворах : автореф. дис. .... д-ра хим. наук. М., 2004.
- 4 *Bobowski J. S., Johnson T.* Permittivity measurements of biological samples by an open-ended coaxial line // Progress Electromag. Res. B. 2012. Vol. 40. Pp. 159–183.
- 5 Офиц. сайт Ресурс. центра С.-Петербург. гос. ун-та. URL: <http://www.dfm.spbu.ru/dielectric-spectrometer.html>
- 6 *Подкин, Ю. Г.* Теоретические основы диэлькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. М. : Научтехлитиздат, 2003. 158 с.

7 Анциферов, Е. А. Аномальное увеличение диэлектрической проницаемости растворов хлоридов щелочных металлов // Депонированные научные работы. 2005. № 7, ВИНТИ. № 700-В 205.

8 Розенталь, О. М. Методы и средства диэлектрических измерений водных растворов электролитов / О. М. Розенталь, Ю. Г. Подкин // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 67–70.

9 Мишков, М. Ю. Разработка диэлькометрических измерительных преобразователей для систем экологического мониторинга пресноводных сред : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2009. 24 с.

*Yu. G. Podkin*, DSc in engineering, professor  
Sarapul Polytechnic Institute (branch)  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Sarapul, Russian Federation

### **Requirements for Building a System for Environmental Monitoring of Fresh Water Reservoirs and Early Warning of Their Pollution**

*The possibility of constructing a system for the environmental monitoring of freshwater sources based on the measurement of dielectric values is considered. It is shown that when pollutants are discharged in the process of establishing equilibrium, a technically distinguishable change is made to the components of the complex permittivity, which makes it possible to establish the fact of pollution and give a qualitative assessment of ecological pathology. An environmental monitoring algorithm has been developed that allows the formation of emergency warning signals.*

**Keywords:** complex permittivity, fresh water, water ecology, jump of permittivity

УДК 543.812.674

*Р. И. Сайтов*, д-р техн. наук, проф.

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

*Р. Г. Абдеев*, д-р техн. наук, проф., директор учебно-научного центра

E-mail: [arg@bgutmo.ru](mailto:arg@bgutmo.ru)

Башкирский государственный университет

*Е. Г. Парфенова*, ст. науч. сотр.

E-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

ФГУП «УНИИМ», г. Екатеринбург

## **Разработка СВЧ-влажомера древесной стружки и опилок**

*В статье приведены результаты разработки и градуировки поточного СВЧ-влажомера древесной стружки и опилок. Выведено эмпирическое уравнение, характеризующее зависимость выходного сигнала СВЧ-преобразователя влагомера от влажности материала.*

**Ключевые слова:** древесная стружка, опилки, влагомер, сверхвысокочастотный, древесностружечная плита.

### **Введение**

Растущие потребности в древесине и пиломатериалах, широко используемых в качестве конструкционного, поделочного и декоративного материала, а также сырья для химической и химико-механической переработки в листовые и плиточные материалы – бумагу, картон, древесноволокнистые и древесностружечные плиты (ДСП), фанеру и др. – вызывают необходимость в оперативной и достоверной информации о качестве сырья и готовой продукции. Производственный контроль качества изделий из древесины, производимых в соответствии с требованиями СНиП 12-01-2004, включает входной контроль влажности исходных пиломатериалов, а также готовых изделий для строительной индустрии.

Отклонение влажности сырья и готовой пилопродукции от допустимых пределов на 1 % приводит к снижению их потребительских свойств, заражению разными древесными насекомыми, что приводит к нарушению требований фитосанитарных норм.

Таким образом, достоверность контроля влажности древесины и сырья из нее является определяющим фактором при оценке ее качества при производстве, хранении, переработке, а также при ее экспорте и импорте.

### Постановка задачи

Следует отметить, что в области строительной влагометрии под термином «влажность» понимают «массовое отношение влаги» или «влагосодержание». В соответствии с РМГ 75-2014 «массовое отношение влаги – это отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к массе сухой части этого вещества».

Основной тенденцией развития современной влагометрии является создание экспрессных и точных приборов для измерений влажности древесины и ее производных, т. к. без использования современных средств измерений невозможно достичь высокого качества продукции.

В качестве сырья для древесностружечных плит используются отходы лесозаготовок, деревообработки (откомлевки, сучья, горбыли, стружка, опилки и т. д.), а также некачественная круглая древесина, из которых производят стружку. Затем сырая стружка подается в сушилки. По технологии стружку разных слоев сушат в отдельных сушилках: до влажности 4–6 %, а для внутреннего слоя плиты до 2–4 %. В производстве ДСП используются конвективные сушилки, преимущественно барабанного типа. На входе в барабан температура сушильного агента достигает от 450 °С до 550 °С, на выходе – от 90 °С до 120 °С. Барабан имеет диаметр 2,2 м и длину 10 м<sup>1</sup>. Сушка в технологии производства плит также осуществляется горячим воздухом, имеющим температуру в диапазоне от 170 °С до 240 °С, при этом время сушки не превышает 5 секунд. Осушенные волокна древесины (влажность не более 9 %) загружаются в циклон. Волокна, готовые к производству древесноволокнистых плит, накапливаются в бункере<sup>2</sup>. При таких условиях технологического процесса сушки осуществлять контроль влажности существующими высокочастотными влагомерами, термогравиметрическими установками не представляется возможным из-за высокой температуры материала и большой скорости сушки [1, 2].

Достоинства СВЧ-метода являются бесконтактность измерений, большая чувствительность к влажности материала, чем к другим его параметрам, что обусловлено явлением резонансного поглощения электромагнитной волны молекулами воды в СВЧ-диапазоне, высокая проникающая способность СВЧ-энергии, что позволяет контролировать значительные объемы материала. Однако влагомеры волокнистых материалов, опилок и стружки, основанные на СВЧ-методе, в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений отсутст-

<sup>1</sup> Технология производства ДСП (древесностружечных плит). URL: [http://www.stroitelstvo-new.ru/drevesina/dsp\\_2.shtml](http://www.stroitelstvo-new.ru/drevesina/dsp_2.shtml)

<sup>2</sup> URL: [http://www.domastroim.su/articles/stena/mdf/mdf\\_1775.html](http://www.domastroim.su/articles/stena/mdf/mdf_1775.html)

вуют. Поэтому разработка отечественного влагомера, основанного на СВЧ-методе, является актуальной задачей.

Рассматриваемые материалы характеризуются существенными неоднородностями в объеме контролируемого образца как по влажности, так и по гранулометрическому составу и плотности, что существенно влияет на точность измерений практически всеми существующими методами, кроме термогравиметрического, и трудно поддаются коррекции [3]. Кроме того, используемые в производстве ДСП стружки получают из разных пород древесины. Разработка СВЧ-влагомера, основанного на измерении прошедшего через образец влажного материала СВЧ-сигнала, требует решения противоречивых требований: с одной стороны, требуется увеличение чувствительности СВЧ-преобразователя к влажности, т. е. увеличение толщины слоя измеряемого образца, с другой стороны – обеспечение необходимого диапазона измерений, т. е. уменьшения толщины слоя измеряемого образца, с тем чтобы уровень выходного сигнала был достаточным для измерения.

В данной работе приведены результаты исследования разработанного нами способа, позволяющего снизить указанные влияния, а также обеспечить необходимый диапазон измерений.

Целью данной работы является разработка и градуировка экспериментальной модели влагомера промышленного назначения, основанного на амплитудном СВЧ-методе и обеспечивающего высокую точность измерений.

### Описание эксперимента

В основу разработки экспериментальной модели влагомера положен способ, основанный на многократных измерениях при вращении исследуемого образца в цилиндрической кювете при постоянном перемешивании за счет неполного ее заполнения и угла откоса материала с последующим усреднением результатов, представленный в авторском свидетельстве СССР № 1419302 22.04 в 1988 г. (Исматуллаев П. Р. и др. Способ измерения влажности). При этом доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины (при  $P = 0,95$ ) определяются из выражения

$$\varepsilon = t_{0,95} \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

где  $t_{0,95}$  – коэффициент Стьюдента;  $S(x_i)$  – оценка среднеквадратического отклонения случайной величины,  $x_i$  – измеряемая случайная величина,  $n$  – число наблюдений.

Возможность снижения случайной составляющей погрешности, обусловленной неоднородностью материала, позволяет расширить диапазон измерений за счет уменьшения толщины слоя измеряемого образца.

Выражение (1) справедливо только для независимых случайных величин, распределенных по нормальному закону, и равноточных измерений. Независимость случайных величин определяется неоднородностью потока и характером распределения воды в веществе, поскольку вода при увлажнении материала распределяется по объему случайным образом.

Влагомер представляет собой моноблок, который содержит: источник электромагнитной энергии; измерительный блок, подключенный к вычислительному блоку; измерительную секцию, снабженную элементами возбуждения и съема электромагнитной энергии, которые выполнены в виде рупорных антенн. Антенны расположены в направлении, перпендикулярном движению потока с внешних противоположных сторон измерительной секции, и соединены соответственно с источником электромагнитной энергии и измерительным блоком. Внутри измерительной секции установлена диэлектрическая пластина, расположенная по ее оси в направлении движения потока между элементами возбуждения и съема электромагнитной энергии.

Принцип работы влагомера основан на измерении интегрального ослабления амплитуды СВЧ-сигнала, прошедшего через образец влажного материала. За счет диэлектрической пластины вращается вектор напряженности электромагнитного поля, что обеспечивает учет неоднородностей. Поэтому единичное измерение уже является результатом многократного измерения, как и при вращении образца, что является отличием разработанного влагомера от аналога, представленного выше. При этом по отношению к скорости потока измерение осуществляется практически мгновенно, что позволяет использовать данный влагомер для измерений в потоке. Кроме того, таких мгновенных «срезов» за время 5 секунд (время сушки) можно получить десятки. В работе [4] нами получено выражение, определяющее приращение выходного сигнала преобразователя СВЧ-влагомера для схемы непосредственного отсчета при соответствующих приращениях параметров схемы и материала:

$$\Delta U = PK_y K_y e^{-\alpha(W, \rho, t, S, H, M) l} \left\{ \left[ \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial W} \Delta W + \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial \alpha(W, \rho, t, S, H, M)}{\partial M} \Delta M \right] l + \left[ \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta K_o}{K_o} + \frac{\Delta K_y}{K_y} \right] \right\}, \quad (2)$$

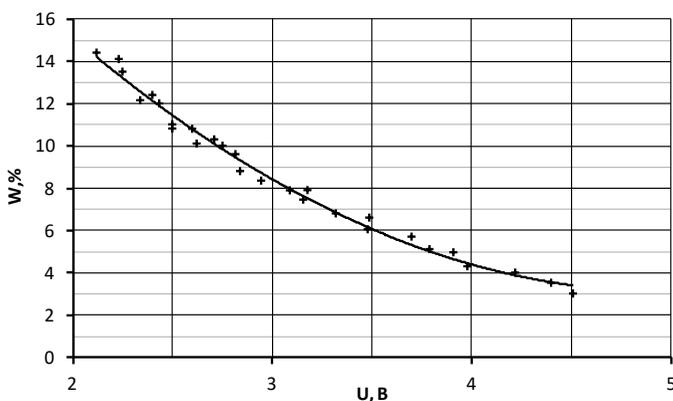
где  $P$  – мощность СВЧ-сигнала;  $k_o$ ,  $k_y$  – коэффициенты передачи детектора и усилителя;  $\alpha$  – коэффициент ослабления амплитуды СВЧ-сигнала; параметры материала:  $W$  – влажность,  $\rho$  – плотность,  $t$  – температура,  $S$  – энергия связи влаги с материалом,  $H$  – степень неоднородности,  $M$  – масса,  $l$  – толщина контролируемого слоя материала.

В выражении (2) первый член суммы показывает изменение выходного сигнала при изменении влажности (информативного параметра), остальные члены первой суммы характеризуют степень влияния неинформативных параметров и определяют методическую погрешность, а вторая сумма из трех слагаемых – инструментальную погрешность. Как следует из выражения (2), в соответствии с (1) предложенное решение позволяет снизить случайные составляющие как методической, так и инструментальной погрешности за счет многократных измерений с последующим усреднением их результатов.

Одной из наиболее важных задач при разработке любого типа влагомера является его градуировка. Градуировка экспериментального образца влагомера проводилась в лабораторных условиях с применением смесей стружек и опилок разных пород древесины.

### Полученные результаты

Образцы имели влажность в наиболее широко востребованном для указанных материалов диапазоне от 3 до 15 %. Аттестованные значения были получены термогравиметрическим методом с применением эталонного оборудования ФГУП «УНИИМ». На рисунке представлен график зависимости выходной величины влагомера (напряжение, В) от влажности материала.



Зависимость показаний влагомера от влажности материала

На основании полученных данных была установлена градуировочная зависимость, которая имеет вид:

$$W = 1,36 \cdot U^2 - 13,55 \cdot U + 36,82, \quad (3)$$

где  $W$  – содержание влаги, %;  $U$  – напряжение, В.

Коэффициент корреляции  $R^2 = 0,983$ .

По результатам работы был оформлен патент на изобретение [5].

## Выводы

Полученные результаты будут использованы для внесения изменений в программное обеспечение СВЧ-влагомера с целью установления его метрологических характеристик непосредственно в производственных условиях, выявления и устранения влияющих факторов на результат измерений.

## Список литературы

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности. Изд. 2-е, прераб. и доп. М. : Энергия, 1973. 400 с.
2. Богданов, Е. С. Сушка пиломатериалов. М. : Лесная промышленность, 1988. 246 с.
3. Расев, А. И. Сушка древесины. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1990. 224 с. : ил.
4. Kovaleva A. A., Saitov R. I., Zaporozhets A. S., Parfenova E. G. Microwave moisture meter for cereal grains // Measurement Techniques. January 2017. Vol. 59, Issue 10. Pp. 1056-1060. DOI: 10.1007/s11018-017-1091-9.

5. Пат. 2695779 Российская Федерация, СПК G01N 22/04 (2019.05). Способ измерения влажности материалов на СВЧ и устройство для его применения / Саитов Р. И., Парфенова Е. Г., Аксенова И. К., Кулакова С. Ю. № 2018122896 ; заявл. 22.06.2018 ; опубл. 26.07.19, Бюл. № 21.

*R. I. Saitov*, DSc in engineering, professor

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

*R. G. Abdeev*, DSc in engineering, professor

E-mail: [arg@bgutmo.ru](mailto:arg@bgutmo.ru)

Bashkir State University, Ufa, Russian Federation

*E. G. Parfenova*, senior researcher

E-mail: [vlaga@uniim.ru](mailto:vlaga@uniim.ru)

Ural Research Institute for Metrology (UNIIM), Ekaterinburg, Russian Federation

### **Development of Microwave Moisture Meter of Wood Chips and Sawdust**

*This article presents the results of the development and calibration of the microwave moisture meter of wood shavings and sawdust. An empirical equation is derived that characterizes the dependence of the output signal of the microwave-moisture transducer on the moisture content of the material.*

**Keywords:** wood chips, sawdust, moisture meter, superhigh frequency, particle board.

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

*А. В. Пряхин*, зав. лабораторией

E-mail: 1814nrt@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## Результаты комплексных испытаний композитной арматуры

*Произведено сравнение результатов измерения физико-механических характеристик композитной арматуры 5 партий 4 производителей с результатами измерения скоростей стержневой волны. Получено согласование результатов измерения модуля упругости и скорости волны.*

**Ключевые слова:** акустический неразрушающий контроль, волноводный метод, дефектоскопия, разработка методики, композитная арматура.

### Введение

Развитие рынка композитной арматуры затруднено в силу отсутствия простых способов контроля ее характеристик. Нормативная база в этой области направлена на применение методов, реализующих прямые измерения. В частности, ГОСТ 32492–2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Метод определения физико-механических характеристик» не содержит экспресс-методов контроля, а отдельные методы требуют длительной подготовки образцов (до 28 дней) [1]. Существующие методы неразрушающего контроля ориентированы в основном на листовые материалы [2] или контроль клеевых соединений [3]. Существующий задел в области ультразвуковых измерений предлагает множество различных способов организации контроля [4, 5]. Методы, реализующие волноводный контроль, в силу значительной протяженности прутка композитной арматуры упрощают схему контроля и дают существенный выигрыш в производительности [6, 7].

Методы, реализующие волноводный контроль, нашли свое применение для контроля пруткового проката и насосных штанг [8–10], труб [11–13] и проволок [14]. Несмотря на существующие особенности ре-

лизации метода при регистрации сигналов [15, 16], специфических требований к аппаратным средствам [17, 18], влияния профиля сечения и дефектов [19–23], метод нашел свое применение на производстве [6, 8, 24].

### Метод контроля

Метод измерения, реализующий волноводную методику, предполагает прозвучивание акустическими волнами с торца объекта контроля (стержневая волна). Оценка акустических свойств производится по величине скорости стержневой волны, проходящей по телу прутка. Типичная эхограмма прозвучивания прутка приведена на рис. 1. На эхограмме различим зондирующий импульс (слева) и три донных импульса. Используемая волна отличается малой дисперсией скорости, что существенно повышает точность измерения.

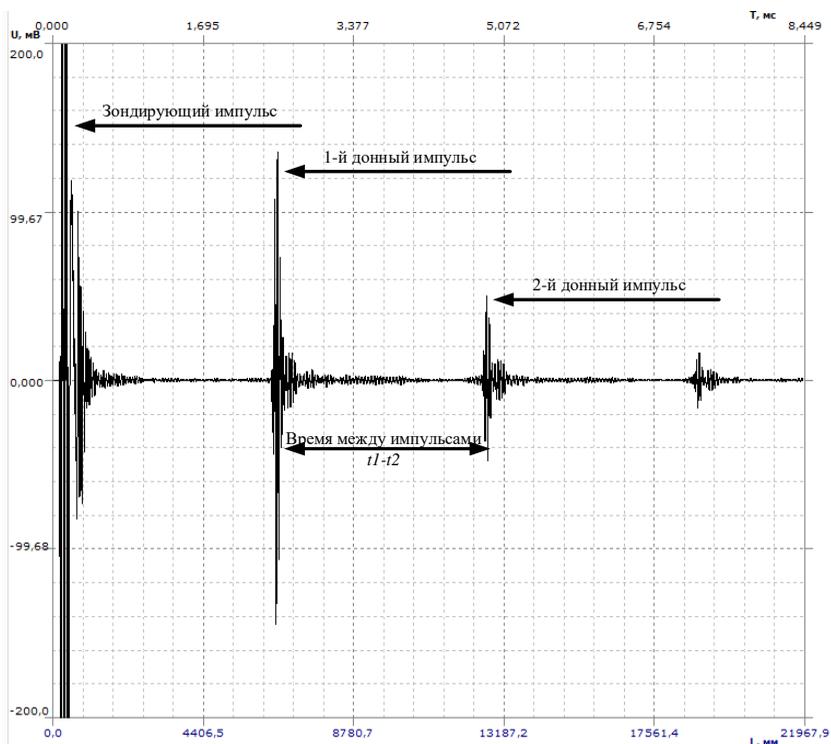


Рис. 1. Эхограмма прутка: стержневая волна (пруток №4-073)

Скорость акустической волны рассчитана по формуле (1) исходя из того, что сигнал излучается и принимается одним и тем же преобразователем, т. е. проходит удвоенный путь по телу объекта контроля:

$$C = 2L/(t_1 - t_2), \quad (1)$$

где  $C$  – скорость акустической волны;  $t_1$  – время начала зондирующего импульса;  $t_2$  – время начала первого донного импульса;  $L$  – длина объекта контроля.

### Физические характеристики материала композитной арматуры

Исследования физико-механических характеристик композитной арматуры проведены на 6 прутках из 5 партий 4 производителей. Измерение номинального диаметра прутка произведено методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 32492). Процент армирования определен методом отжига. Измерение степени полимеризации произведено в соответствии с известной методикой [25]. Прутки разных производителей отличаются в широком диапазоне физических характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Средние в партии значения физико-механических характеристик и значения скоростей стержневой волны

| № партии                                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--|------|------|------|------|------|
| Диаметр номинальный $d$ , мм               | 8,3  | 8,2  | 7,4  | 7,9  | 7,1  |
| Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>       | 2,0  | 2,0  | 2,0  | 2,2  | 2,1  |
| Содержание стекловолна в арматуре, %       | 77,4 | 83,3 | 78,4 | 86,6 | 86,7 |
| Водопоглощение, %                          | 1,91 | 0,89 | 1,98 | 0,06 | 0,06 |
| Степень полимеризации компанда, %          | 75,6 | 84,0 | 78,7 | 99,5 | 99,5 |
| Измеренный модуль упругости $E$ , ГПа      | 48,6 | 50,6 | 49,1 | 54,5 | 53,0 |
| Средняя скорость стержневой волны, $C$ м/с | 4834 | 4916 | 4742 | 5015 | 4931 |
| Расчетный модуль упругости $E_p$ , ГПа     | 45,9 | 49,4 | 44,2 | 54,6 | 52,1 |

### Сравнение результатов физических и механических испытаний с результатами измерения скоростей акустической волны

Соотношение между измеренным значением модуля упругости и скоростью стержневой волны для всех образцов из 5 партий иллюстрирует рис. 2. Горизонтальная ось отградуирована значениями измеренного модуля упругости  $E$  в ГПа. По вертикальной оси отложены значения

скорости стержневой волны  $C$  в м/с. Каждый образец представлен двумя точками с одним средним значением скорости стержневой волны и двумя независимыми значениями модуля упругости, полученными на разных фрагментах прутка композитной арматуры. Следует отметить, что волноводный метод прозвучивания композитной арматуры усредняет все участки прутка, а метод измерения модуля упругости дает значение на локальном участке и не обладает значительной точностью. Как следствие, существенный разброс измеренных значений модуля упругости при узком диапазоне разброса скоростей.

Партии № 1 и 3 характеризуются существенными отклонениями механических характеристик по телу прутка, что приводит как к значительному разбросу по скоростям, так и низкому значению модуля упругости.

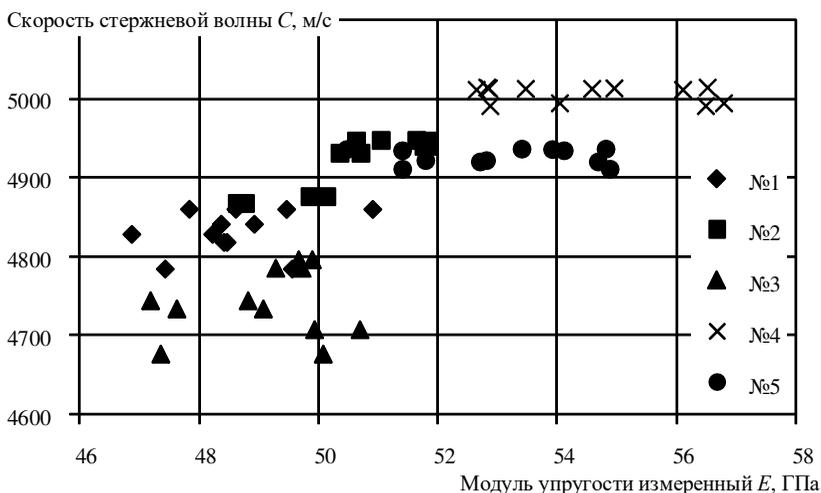


Рис. 2. Соответствие скорости стержневой волны и значения модуля упругости

На рис. 3 показаны средние значения измеренного модуля упругости  $E$  и соответствующие им средние значения стержневой волны  $C$  в партии. Планки погрешностей нанесены по уровню значимости 0,05. Партия № 3 по средним значениям скорости выпадает из последовательности «больше модуль упругости – выше скорость стержневой волны». При этом следует отметить, что арматура партии № 3 имеет профиль, существенно отличающийся от профилей других партий. Партия № 3 имеет однозаходную нить с частым шагом намотки. Данная особенность требует дополнительного исследования.

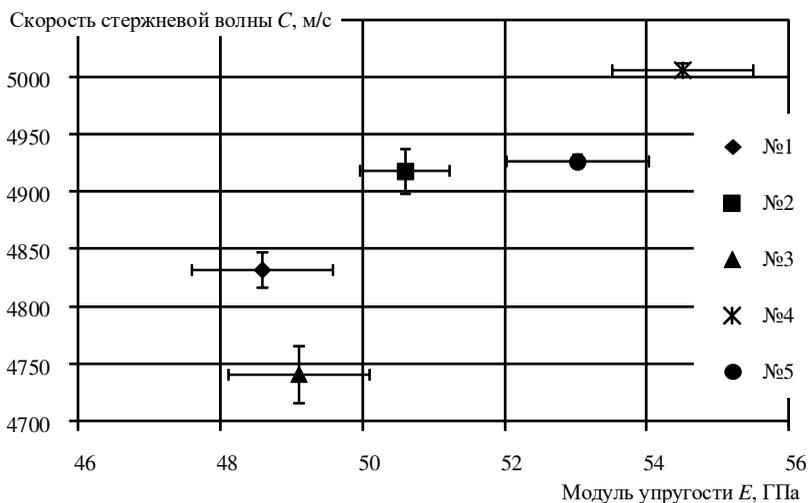


Рис. 3. Соответствие скорости стержневой волны и значения модуля упругости

Исходя из известного соотношения [5], на основании полученных ранее значений плотности произведен оценочный расчет модуля упругости:

$$E_p = \rho C^2, \quad (2)$$

где  $E_p$  – расчетное значение модуля упругости;  $\rho$  – плотность материала объекта;  $C$  – скорость стержневой волны. Расчет произведен индивидуально для каждого образца по среднему значению скорости и средней плотности (рис. 4).

Зависимость между измеренным и расчетным значением модуля упругости носит линейный характер и для партий № 4 модули совпадают по численному значению. Пунктиром показана линия равенства расчетного модуля упругости  $E_p$  и измеренного модуля упругости  $E$ .

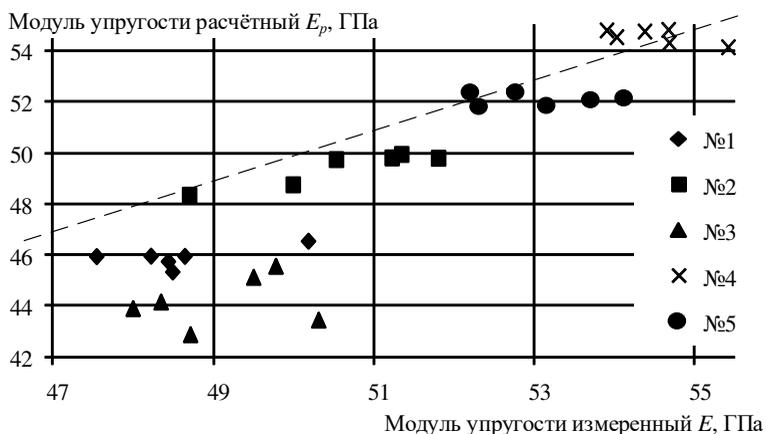


Рис. 4. Соответствие рассчитанного модуля упругости  $E_p$  величине измеренного модуля упругости  $E$

## Выводы

Качество композитной арматуры у разных производителей существенно отличается. Методы оценки качества композитной арматуры требуют значительных временных затрат и не обладают высокой точностью. Разработанный метод акустической структуроскопии композитной арматуры с использованием комплекса оборудования, реализующего волноводный метод контроля, позволяет оценить модуль упругости по информативному параметру – скорости распространения стержневой волны. Получено согласование результатов измерения модуля упругости и скорости стержневой волны.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова ИжГТУ» (проект №12.06.01/18МОВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).*

## Список литературы

1. Бучкин, А. В. Основные направления развития нормативной базы по композитным материалам в строительстве / А. В. Бучкин, А. А. Шевнин, С. В. Семенова // Сборник докладов четвертой научно-технической конференции, 23.11.18. Ижевск, 2018. С. 8–16. ISBN 978-5-9631-0670-9
2. Трифонова, С. И. Современные технологии и средства теневого ультразвукового контроля полимерных композиционных материалов / С. И. Трифонова

ва, А. С. Генералов, М. А. Далин // Технология машиностроения. 2017. № 7. С. 37–43.

3. Мурашов, В. В. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами / В. В. Мурашов, А. С. Генералов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2 (31). С. 59–67.

4. Неразрушающий контроль : справ. в 8 т. / А. И. Евлампиев, Е. Д. Попов, С. Г. Сажин, Ю. К. Федосенко, В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, Ю. Я. Останин ; под общ. ред. В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и испр. М., 2006.

5. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М. : Изд-во ин. лит., 1957. 728 с.

6. Акустический волноводный контроль линейно протяженных объектов / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, С. А. Мурашов, А. В. Пряхин ; М-во обр. и науки РФ, ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2017. 234 с. ISBN 978-5-7692-1560-5

7. 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.

8. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Фокеева // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 43–51.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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. С. 51–56.

13. 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.

14. Muraviev V. V., Korobeynikova O., Platanov A. B. The influence of internal stress and structural state in wires on the basic characteristics of pohammer's waves // 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Abstracts. 2010. Pp. 121-122.

15. Pulse method of measuring the speed of ultrasound / G. A. Budenkov, V. A. Strizhak, A. V. Pryakhin, G. A. Polyankin, Ya.Yu. Korshunov, O. V. Nedzvetskaya // Дефектоскопия. 1998. Vol. 9. Pp. 3-8.

16. Факторы, влияющие на эффективность возбуждения крутильных волн при волноводном контроле труб / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, В. В. Муравьев, Ю. В. Мышкин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. 2016. № 2. С. 33–41.

17. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 173–178.

18. *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.

19. *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.

20. *Муравьева, О. В.* Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, Ю. В. Мышкин // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 3–10.

21. *Буденков, Г. А.* Основные закономерности взаимодействия волн похгаммера с дефектами / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. 2004. № 2. С. 33–46.

22. *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

23. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Ленков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. 2016. № 1. С. 117–124.

24. Опыт приемочного акустического контроля и упрочнения насосных штанг при сервисном обслуживании / Г. А. Буденков, О. В. Коробейникова, Н. А. Кокорин, В. А. Стрижак // В мире неразрушающего контроля. 2007. № 4. С. 14–19.

25. *Грахов, В. П.* Методика определения степени отверждения арматуры композитной полимерной / В. П. Грахов, З. С. Саидова // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 1. С. 96–98. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-1-96-98

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

E-mail: str@istu.ru

R. R. Hasanov, postgraduate student

E-mail: beif@mail.ru

S. S. Mkrichyan, master student

E-mail: sergsmile@yandex.ru

A. V. Pryakhin, head of laboratory

E-mail: 1814nrt@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Results of Complex Testing of Composite Reinforcement**

*The results of measurement of physical and mechanical characteristics of composite reinforcement of 5 batches of 4 manufacturers are compared with the results of measurement of rod wave velocity. The results of the measurements of the elastic modulus and the wave velocity are well compliant.*

**Keywords:** acoustic non-destructive testing, guided wave testing, defectoscopy, development of procedure, composite reinforcement.

УДК 620.179

*А. В. Якимов*<sup>1</sup>, аспирант  
*В. В. Муравьев*<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф., зав. каф. «ПМИКД»  
*К. А. Тапков*<sup>1</sup>, аспирант  
*А. В. Андреев*<sup>1</sup>, магистрант  
E-mail: pmkk@istu.ru

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск

### **Исследование распределения остаточных напряжений в рельсах методом акустоупругости**

*Представлены экспериментальные результаты измерений остаточных напряжений по сечениям в отрезках рельса Р65 длиной 1,4 м и длиной 12,5 м. Полученные значения были исследованы на предмет наличия периодических колебаний остаточных напряжений по сечениям рельса. По результатам анализа удалось выявить периодические колебания непосредственных значений напряжений по сечению для 1,4 м отрезков, для которых период составил 0,25–0,50 м, и период колебаний для 12,5 метрового отрезка рельса, для которого период колебаний составил 0,7–0,9 м. Также по результатам анализа выдвинуто предположение о наличии периодических колебаний усредненных значений остаточных напряжений (период составил около 9 м). Полученные результаты возможно использовать для прогнозирования значений остаточных напряжений в рельсах.*

**Ключевые слова:** акустоупругость, остаточные напряжения, структура, рельсы, электромагнитно-акустический преобразователь.

#### **Введение**

Разработка методик измерения накопленных остаточных напряжений в изделиях, находящихся в эксплуатации, является актуальной задачей, в том числе и для железнодорожной отрасли по причине повышения грузопотока и скоростей движения подвижного состава. Большое влияние на безопасность эксплуатации железнодорожного транспорта имеют рельсы – элементы верхнего строения пути. Из-за высоких значений остаточных напряжений возможно возникновение различных дефектов, в частности трещин и выброса пути, а также ускоренное развитие уже имеющихся дефектов. Своевременный контроль значений остаточных напряжений позволит избежать внезапного разрушения

рельса, проводить плановый ремонт железнодорожного пути взамен экстренного и, как следствие, поможет избежать возможные аварии.

Однако неразрушающие методики контроля остаточных напряжений в рельсах, согласно ГОСТ 51685–2013, в настоящее время не применяются. Их применение осложнено, в том числе непосредственной доступностью исключительно поверхности катания рельса, и сложным напряженно-деформированным состоянием рельса [1].

Согласно материалу ранее проведенных исследований [2–4] остаточные напряжения могут значительно меняться в различных сечениях по длине рельса. В связи с этим для внедрения методики неразрушающего контроля остаточных напряжений в рельсах становится актуальным вопрос о допустимом интервале между измеряемыми сечениями рельса.

### Электромагнитно-акустический способ оценки напряжений

Оценка напряженного состояния рельсов проведена с использованием метода акустоупругости, основанного на измерении скорости распространения акустических волн при прозвучивании по высоте рельса поперечными волнами, ортогонально поляризованными в продольном и поперечном направлениях [2–4].

Напряженное состояние рельсов оценивается по формулам акустоупругости для одноосного напряженного состояния следующего вида (ГОСТ Р 52731. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений):

$$\sigma = D \left( \frac{t_1}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{01}} - 1 \right) = Da - Da_0 \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{t_{02} - t_{01}}{t_{02}}, \quad a = \frac{t_2 - t_1}{t_2},$$

где  $Da$  – фактор акустической анизотропии материала, обусловленный вкладом напряженного состояния, текстуры проката и структуры после термической обработки;  $Da_0$  – фактор, учитывающий вклад текстуры и структуры;  $t_1$  и  $t_2$  – значения измеряемых времен распространения сдвиговых волн, поляризованных в продольном и поперечном направлениях соответственно;  $t_{01}$  и  $t_{02}$  – значения времени распространения сдвиговых волн в отсутствии напряженного состояния;  $D$  – акустоупру-

гий коэффициент, полученный экспериментально для исследуемой углеродистой стали ( $D = -131$  ГПа).

Значения времени распространения сдвиговых волн  $t_{01}$  и  $t_{02}$  определяются по толщине фрагмента рельса, освобожденного от связи границ, изготовленного из одного рельса из партии для проведения испытаний по учету влияния структуры и текстуры.

Для формирования поперечных волн использован электромагнитно-акустический (ЭМА) способ возбуждения и приема волн с помощью прибора СЭМА, структурная схема которого представлена на рис. 1. Генератор электрических импульсов 2 формирует мощный зондирующий электрический импульс, ЭМА-преобразователь 3 возбуждает и принимает в объекте контроля 1 акустические импульсы, которые поступают на усилитель 4 и плату АЦП 5.

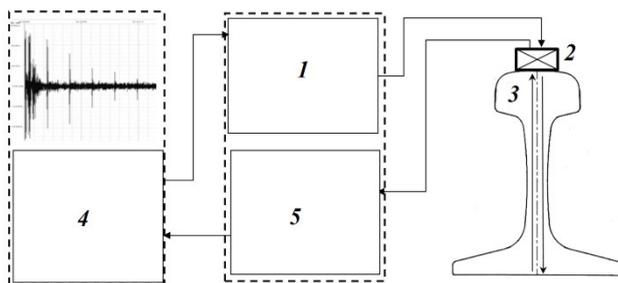


Рис. 1. Структурная схема установки: 1 – генератор; 2 – ЭМА-преобразователь; 3 – объект контроля; 4 – ПК с платой АЦП; 5 – ПК с платой АЦП

Обработка осциллограмм производится в программной среде ПРИНЦ (св-во № 2011614594) [5]. Погрешность измерений составляет 3 МПа.

### Результаты экспериментального исследования напряжений

Экспериментальное исследование остаточных напряжений проводилось на образцах рельса Р65 длиной 1,4 м в помещении при температуре 20 °С с интервалом 0,05 м. Образцы имели искусственный дефект. Результаты измерений представлены на рис. 2. Пунктиром на графике выделена область дефекта, в которой измерения не проводились по причине рассеивания либо отражения волны при прохождении через дефект.

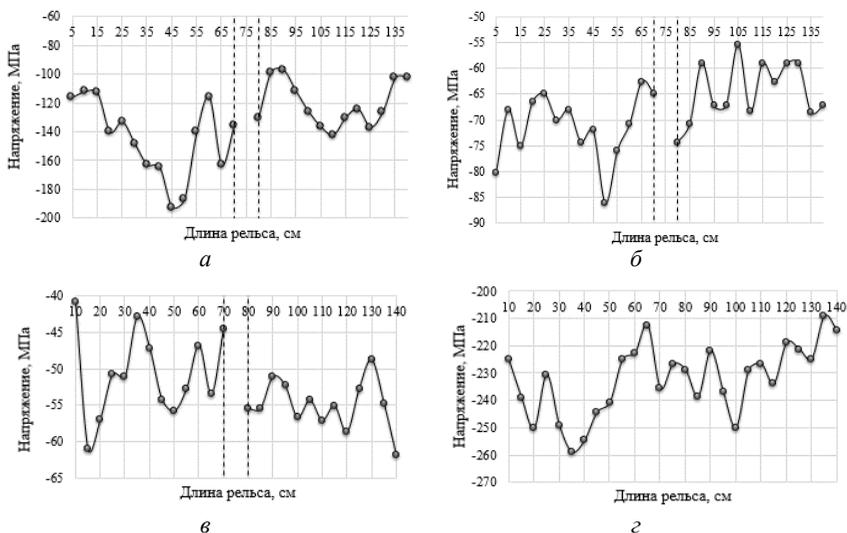


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений по длине рельса: а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3; г – образец № 4

Также экспериментальное исследование остаточных напряжений проводилось на образце рельса Р65 длиной в 12 м (образец № 5) с интервалом 0,05, 0,1, 0,2 м в разных сечениях при температуре 20 °С. Результаты измерений представлены на рис. 3.

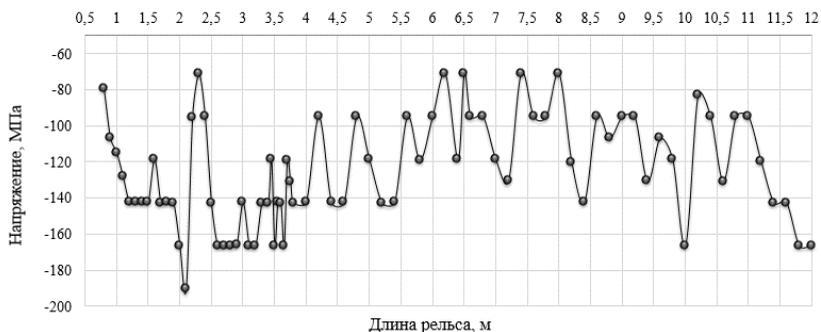


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений по длине рельса образец № 5

### Анализ полученных результатов

Полученные экспериментальные данные подтверждают гипотезу о существовании разброса напряжений внутри одного рельса по сечению. В то же время можно говорить о существовании колебаний значений остаточных напряжений по длине рельса. В частности, период в 0,5 м прослеживается для образца № 1. Для образца № 2 и № 4 выявить периодичность не удалось, образец № 3 имеет период в пределах 0,25–0,40 м. В образце № 5 период колебаний значений остаточных напряжений составил около 0,7–0,9 м.

В то же время методы полиномиальной аппроксимации при проведении линии тренда (пунктирная линия на рис. 4) показали наличие колебаний средних значений остаточных напряжений с предполагаемым периодом около 9 м. Однако для уточнения наличия/отсутствия постоянного периода колебаний необходимо проведение измерений на более длинных отрезках рельса.

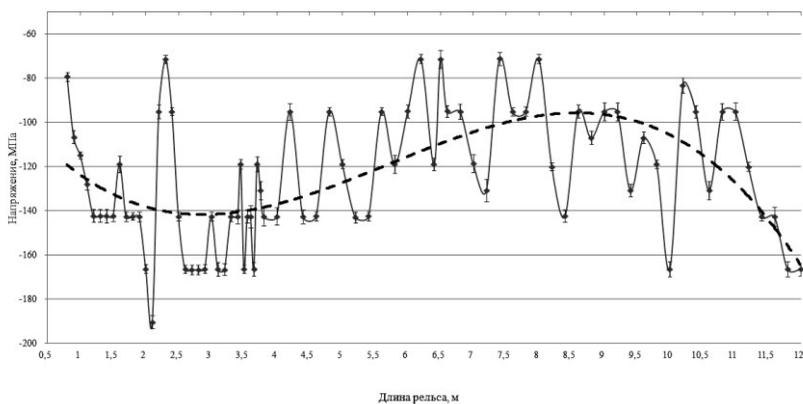


Рис. 4. Полиномиальная аппроксимация значений остаточных напряжений в 12,5-метровом отрезке рельса

Причиной резких скачкообразных изменений напряжений в соседних сечениях рельса может являться наличие области зарождения дефекта. Возникновение периодических колебаний напряжений по сечению рельса может быть вызвано технологическими особенностями производственного процесса.

### Выводы

1. В соседних сечениях отрезка рельсов наблюдаются существенные колебания напряжений вокруг определенного значения. Периоды коле-

баний непостоянны и могут составлять от 0,25–0,50 м в коротких (1,4 м) отрезках рельса, и более (около 0,7–0,9 м) в 12,5-метровом отрезке рельса.

2. Выдвинуто предположение о наличии периодических колебаний усредненных значений напряжений с периодом на порядок больше (около 9 м).

3. Полученные результаты показывают возможность прогнозирования остаточных напряжений в той или иной точке рельса. В то же время появление локальных дефектов (трещины) зависит от напряженного состояния конкретного сечения, поэтому при выявлении периода возможно проведение диагностики определенных сечений рельса, наиболее подверженных риску наличия высокого значения остаточных напряжений.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» (проект №12.06.01/18МВВ) с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для измерения акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308), ЦКП ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН».*

#### Список литературы

1. *Никитина, Н. Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород : ТАЛАМ, 2005. 208 с.
2. *Муравьев, В. В.* 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.
3. *Тапков, К. А.* Моделирование напряжённо-деформированного состояния дифференцированно термоупрочнённых рельсов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16, № 2. С. 78–83.
4. *Муравьев, В. В.* 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. 13–23. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.
5. *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.

A. V. Yakimov<sup>1</sup>, postgraduate student  
V. V. Muravev<sup>1,2</sup>, DSc in engineering, professor, head of PMIKD department  
K. A. Tapkov<sup>1</sup>, postgraduate student  
A. V. Andreev<sup>1</sup>, master student  
E-mail: pmkk@istu.ru

<sup>1</sup> Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Udmurt Federal Research Centre UB RAS, Izhevsk, Russian Federation

### **The Study of Residual Stresses Distribution in Rails by the Method of Acoustoelasticity**

*The experimental results of measurements of residual stresses over sections in sections of rail R65 1.4 m long and 12.5 m long are presented. The results obtained were examined for the presence of periodic oscillations of residual stresses along rail sections. According to the results of the analysis, it was possible to identify periodic fluctuations of the direct values of stresses over the cross section for 1.4 m of segments, for which the period was 0.25–0.50 m, and the period of oscillations for the 12.5 meter rail segment, for which the period of oscillations was 0.7–0.9 m. The analysis suggested that there are periodic fluctuations in the averaged values of residual stresses (the period was about 9 m). The results can be used to predict the values of residual stresses in the rails.*

**Keywords:** acoustoelasticity, residual stresses, structure, rails, electromagnetic-acoustic transducer.

---

## Секция 3. Радиотехника, связь, информационные технологии

УДК621.372

*М. Е. Александрова*, специалист  
E-mail: alexandrova98m@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

### **Формирование сигналов в цифровых усилителях мощности с помощью перераспределения энергии в спектре импульсной последовательности**

*В работе представлены методы формирования импульсных сигналов с помощью перераспределения спектра импульсной последовательности. Были рассмотрены методы адаптации системы  $\alpha$ , с помощью которых при воздействии искажений при построении системы сохраняется спектр, близкий к теоретическому.*

**Ключевые слова:** спектр, усилитель, импульс, гармоники, коэффициенты, амплитуда.

#### **Введение**

При проектировании усилителей мощности для достижения высокого коэффициента полезного действия (КПД) используют ключевой режим работы транзисторов [1]. Такой режим обеспечивается в усилителях D-класса, где ключевой режим достигается за счет преобразования аналогового сигнала в последовательность прямоугольных импульсов посредством широтно-импульсного модулятора (ШИМ) [2]. Отсутствие электромагнитных помех и КПД в ШИМ-сигнале напрямую зависит от линейности модулятора, которую сложно обеспечить на высоких частотах [3]. Рассмотрим другой способ преобразования аналогового сигнала в последовательность прямоугольных импульсов, но уже не зависящий от параметров, подобных ШИМ-модуляции, потому что формирование происходит совсем другим методом. Для формирования спектра, в котором полезный усиливаемый гармонический сигнал концентрирует в себе основную энергию, были подобраны определенные импульсные последо-

вательности  $\alpha$ ,  $\beta$  [4] и  $\alpha_1$  [5]. Эти системы перераспределяют энергию в спектре, разделяя спектр на две области: область, где сосредоточен полезный усиливаемый сигнал, и область ненужных гармоник. Рассмотрим принцип формирования таких систем на примере системы  $\alpha$ .

### Постановка задачи

При сложении гармонических сигналов с одинаковыми амплитудами и частотами, в зависимости от их фазового соотношения, результат получается разный. На рис. 1 в варианте *a* при сложении двух сигналов результирующая амплитуда сигнала равна нулю. В варианте *b* результирующая амплитуда увеличилась, энергия двух сигналов сложилась [6]. Могут быть варианты сложения гармонических сигналов с различными амплитудами и частотами. В таких случаях возможно увеличение энергии гармоник и равенство нулю амплитуд гармоник [7]. Эти основные принципы используются в дальнейшем.

Все реальные периодические нелинейные сигналы, удовлетворяющие условиям Дирихле, могут быть представлены бесконечным тригонометрическим рядом Фурье [8]. Из этого следует, что любой негармонический периодический сигнал можно представить суммой гармонических сигналов, причем определенных амплитуд и частот [9]. В зависимости от ширины нелинейного импульсного сигнала, гармонические сигналы, которыми представляется импульсный сигнал, будут иметь различные амплитуды. Если изменить ширину импульса, то изменятся амплитуды гармоник в его спектре [7]. Из этого следует вывод, что можно получать необходимые амплитуды гармонических составляющих спектра, управляя шириной импульса. При одновременном расположении на периоде нескольких нелинейных импульсных сигналов складываются между собой по амплитуде спектральные составляющие каждого из них, происходит сложение гармонических сигналов, в результате которого происходит уменьшение или увеличение энергии [10]. Рассмотрим импульсную последовательность, систему  $\alpha$ , изображенную на рис. 1,  $c: T = 1$  с,  $U = 1$  В,  $k = 1/3$ .

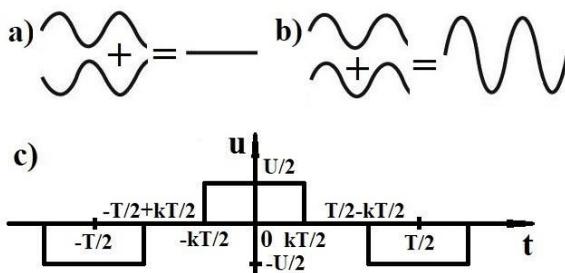


Рис. 1. Варианты сложения гармонических сигналов (а), (b), прямоугольные импульсы из периодической системы  $\alpha$  (с)

Спектр данной периодической последовательности на интервале  $(-T/2, T/2)$  описывается функцией:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U}{2}, & \text{при } -\frac{kT}{2} \leq t \leq \frac{kT}{2}; \\ -\frac{U}{2} & \text{при } -\frac{T}{2} \leq t \leq -\frac{T}{2} + \frac{kT}{2}, \frac{T}{2} - \frac{kT}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}. \\ 0, & \text{при других } t \end{cases} \quad (1)$$

Коэффициенты  $a_n$  рассматриваемого ряда вычисляются по методике из работы [10]. Вычислим коэффициенты  $a_n - a_{n2}$  при различных значениях  $n$  (табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициентов при различных значениях  $n$

| $n$      | 1     | 2     | 3 | 4     | 5     |
|----------|-------|-------|---|-------|-------|
| $a_{n1}$ | 0,275 | 0,14  | 0 | -0,07 | -0,05 |
| $a_{n2}$ | 0,275 | -0,14 | 0 | 0,07  | -0,05 |
| $a_n$    | 0,55  | 0     | 0 | 0     | -0,1  |

Из табл. 1 видно, что расположение импульсов на периоде подобрано так, что коэффициенты  $a_{n1}$  и  $a_{n2}$  для второй, третьей и четвертой гармоник имеют противоположные значения и при сложении дают нуль. Основная энергия спектра концентрируется на первой гармонике. Такой же принцип используется и при построении систем  $\beta$  и  $\alpha 1$ . При построении импульсных систем  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\alpha 1$  из исходного гармонического сигнала с использованием триггерных схем [11, 12] невозможно получить идеальный теоретический спектр. К исходному гармоническому спектру добавляется шум [13]. В результате этого может измениться временное расположение импульсов или при большом уровне шума прямоугольный сигнал превратится в совокупность коротких импульсов

[14]. При искажении формы сигнала или изменении временного расположения импульсов вблизи полезного сигнала появляются лишние гармоники, т. к. сумма  $a_{n1}$  и  $a_{n2}$  уже не будет равняться нулю. Чтобы сохранить необходимый спектр в рассматриваемой области, система должна адаптироваться под шум.

### Решение задачи

Для сохранения спектра в определенной области необходимо вместо построения одного импульса на интервалах периода построить несколько импульсов, регулируя их ширину и амплитуду так, чтобы сумма всех коэффициентов  $a_{n1} + a_{n2} + \dots + a_{nm}$  от каждого импульса для каждой ненужной гармоники равнялась нулю. Для этого необходимо в зависимости от шумов изменять построение системы. Это может быть как первоначальное изменение вариацией количества импульсов и их ширины на оси времени, так и изменение системы после ее формирования с добавлением дополнительных импульсов или изменением амплитуды уже имеющих импульсов на оси времени. Рассмотрим несколько методов адаптации системы на воздействие помех на примерах.

### Результаты и их обсуждение

*Пример 1.* Рассмотрим пример адаптации системы, когда исходный импульсный сигнал превращается в совокупность коротких импульсов. Система симметрична и идеализирована для примера. Рассмотрим импульсную последовательность, изображенную на рис. 2,  $a$ , где  $T = 1$  с,  $U = 1$  В. Функция  $u(t)$  симметрична относительно оси ординат. Значения констант, определяющих расположения импульсов на оси времени:

$$a = (T/2) * 0,029, b = (T/2) * 0,039, c = (T/2) * 0,087, d = (T/2) * 0,097, e = (T/2) * 0,136, f = (T/2) * 0,146, g = (T/2) * 0,189, h = (T/2) * 0,199, i = (T/2) * 0,237, j = (T/2) * 0,247, l = (T/2) * 0,295, m = (T/2) * 0,305, p = (T/2) * (1/3), a_1 = 0,971 * (T/2), b_1 = 0,961 * (T/2), c_1 = 0,913 * (T/2), d_1 = 0,903 * (T/2), e_1 = 0,864 * (T/2), f_1 = 0,854 * (T/2), g_1 = 0,811 * (T/2), h_1 = 0,801 * (T/2), i_1 = 0,763 * (T/2), j_1 = 0,753 * (T/2), l_1 = 0,705 * (T/2), m_1 = 0,695 * (T/2), p_1 = (2/3) * (T/2).$$

Спектр данной периодической последовательности на интервале  $(0, T/2)$  описывается функцией:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{U}{2}, \text{ при } 0 \leq t \leq a; b \leq t \leq c; d \leq t \leq e; \\ f \leq t \leq g; h \leq t \leq i; j \leq t \leq l; m \leq t \leq p \\ \frac{U}{2} \text{ при } p_1 \leq t \leq m_1; \\ l_1 \leq t \leq j_1; i_1 \leq t \leq h_1; g_1 \leq t \leq f_1; \\ e_1 \leq t \leq d_1; c_1 \leq t \leq b_1; a_1 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, \text{ при других } t \end{cases} \quad (2)$$

Коэффициенты  $a_{n3}$  в табл. 2 вычисляются аналогично расчету в системе  $\alpha$ .

Таблица 2. Значения коэффициентов при различных значениях  $n$

| $n$      | 1    | 2 | 3      | 4 | 5     |
|----------|------|---|--------|---|-------|
| $a_{n3}$ | 0,45 | 0 | 0,0004 | 0 | -0,08 |

Из табл. 2 видно, что система адаптирована так, что при совокупности коротких импульсов сумма коэффициентов в определенных гармониках равна нулю или сведена к ничтожно малому значению.

*Пример 2.* Теперь рассмотрим вариант с той же адаптацией, но с другим расположением и другой шириной импульсов. Рассмотрим импульсную последовательность с таким же количеством импульсов, как на рис. 2,  $a: T = 1$  с,  $U = 1$  В. Только теперь значения констант, определяющих расположения импульсов на оси времени, будут иметь следующие значения:

$$a = (T/2) * 0,034, b = (T/2) * 0,044, c = (T/2) * 0,083, d = (T/2) * 0,093, e = (T/2) * 0,13, f = (T/2) * 0,138, g = (T/2) * 0,183, h = (T/2) * 0,195, i = (T/2) * 0,242, j = (T/2) * 0,251, l = (T/2) * 0,297, m = (T/2) * 0,307, p = (T/2) * 0,334, a_1 = 0,966 * (T/2), b_1 = 0,956 * (T/2), c_1 = 0,917 * (T/2), d_1 = 0,907 * (T/2), e_1 = 0,87 * (T/2), f_1 = 0,862 * (T/2), g_1 = 0,817 * (T/2), h_1 = 0,805 * (T/2), i_1 = 0,758 * (T/2), j_1 = 0,749 * (T/2), l_1 = 0,703 * (T/2), m_1 = 0,693 * (T/2), p_1 = 0,666 * (T/2).$$

Коэффициенты  $a_{n4}$  в табл. 3 вычисляются аналогично расчету в системе  $\alpha$ .

Таблица 3. Значения коэффициентов при различных значениях  $n$

| $n$      | 1    | 2 | 3 | 4 | 5     |
|----------|------|---|---|---|-------|
| $a_{n4}$ | 0,45 | 0 | 0 | 0 | -0,08 |

*Пример 3.* Теперь рассмотрим пример, когда адаптация системы происходит не только за счет изменения количества и ширины импульсов, но и за счет изменения амплитуды импульсов.

Рассмотрим импульсную последовательность, изображенную на рис. 2,  $b$ ,  $T = 1$  с,  $U = 1$  В. Функция  $u(t)$  симметрична относительно оси ординат.

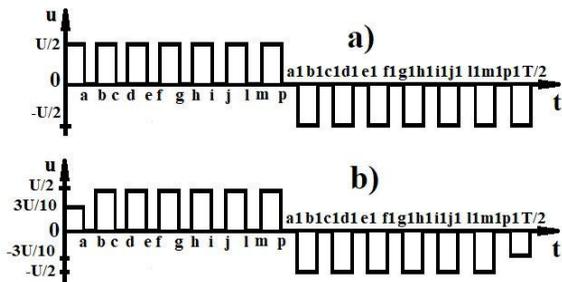


Рис. 2. Прямоугольные импульсы из периодической системы  $\alpha$

Значения констант, определяющих, расположения импульсов на оси времени:

$$\begin{aligned}
 a &= (T/2) * 0,034, b = (T/2) * 0,039, c = (T/2) * 0,018, d = (T/2) * \\
 &0,193, e = (T/2) * 0,211, f = (T/2) * 0,217, g = (T/2) * 0,231, h = \\
 &(T/2) * 0,238, i = (T/2) * 0,263, j = (T/2) * 0,272, l = (T/2) * \\
 &0,3, m = (T/2) * 0,307, p = (T/2) * 0,339, a_1 = 0,966 * (T/2), b_1 = \\
 &0,961 * (T/2), c_1 = 0,82 * (T/2), d_1 = 0,807 * (T/2), e_1 = 0,789 * \\
 &(T/2), f_1 = 0,783 * (T/2), g_1 = 0,769 * (T/2), h_1 = 0,762 * (T/2), i_1 = \\
 &0,737 * (T/2), j_1 = 0,728 * (T/2), l_1 = 0,7 * (T/2), m_1 = 0,693 * (T/2), \\
 &p_1 = 0,661 * (T/2).
 \end{aligned}$$

Спектр данной периодической последовательности на интервале  $(0, T/2)$  описывается функцией:

$$u(t) = \begin{cases} u(t) = \frac{3U}{10}, \text{ при } 0 \leq t \leq a; \\ u(t) = \frac{U}{2}, \text{ при } b \leq t \leq c; d \leq t \leq e; \\ f \leq t \leq g; h \leq t \leq i; j \leq t \leq l; m \leq t \leq p \\ u(t) = -\frac{U}{2} \text{ при } p_1 \leq t \leq m_1; l_1 \leq t \leq j_1; \\ i_1 \leq t \leq h_1; g_1 \leq t \leq f_1; e_1 \leq t \leq d_1; c_1 \leq t \leq b_1; \\ u(t) = -\frac{3U}{10}, \text{ при } a_1 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, \text{ при других } t. \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициенты  $a_{n5}$  в табл. 4 вычисляются аналогично расчету в системе  $\alpha$ .

Таблица 4. Значения коэффициентов при различных значениях  $n$ .

| $n$      | 1    | 2 | 3      | 4 | 5     |
|----------|------|---|--------|---|-------|
| $a_{n5}$ | 0,46 | 0 | 0,0001 | 0 | -0,08 |

В примере 3 видно, что возможна обработка сигнала после построения системы, изменена амплитуда первого построенного импульса. При сравнении с ШИМ-сигналом можно увидеть, что спектр системы  $\alpha$  не имеет больших гармоник, кроме гармоник полезного гармонического сигнала. При построении ШИМ-сигнала система не может адаптироваться под искажения в отличие от системы  $\alpha$  и напрямую зависит от линейности модулятора.

### Выводы

Анализ рассмотренных примеров показывает, что при создании усилителей мощности возможно построение импульсной системы  $\alpha$  с возможностью ее адаптации под шум. По сравнению со структурой построения ШИМ-сигнала, система  $\alpha$  не зависит от линейности модулятора, потому что формирование происходит совсем другим методом. Гармонический состав спектра системы  $\alpha$  при воздействии шумов сохраняется за счет необходимого изменения количества, ширины и высоты импульсов системы.

### Список литературы

1. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника : учеб. для вузов / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин ; под ред. В. А. Лабунцова. М. : Энергоатом-издат, 1988. 320 с.
2. Безверхний, И. Третье поколение микросхем УМЗЧ класса Dot Texas Instruments // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С.100–104.
3. Разуваев, Ю. Ю. Математическое моделирование усилителя мощности D-класса на основе широтно-импульсной модуляции // Вестник ВГУ. Серия: «Физика. Математика». 2017. № 2. С. 46–53.
4. Александрова, М. Е. Умножение частоты в высокостабильных кварцевых генераторах на основе перераспределения энергии в спектре по гармоникам // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2018. № 7. С. 49–60.
5. Александрова, М. Е. Формирователь гармонических сигналов на основе перераспределения спектра импульсной последовательности // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. № 1. С. 254–259.
6. Johnsen, S. The Optics of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature. Princeton University Press. 2012. 368 p.
7. Добротворский, И. Н. Теория электрических цепей : учеб. для техникумов. М. : Радио и связь, 1989. 472 с.

8. *Воробьев, Н. Н.* Теория рядов: Избранные главы высшей математики для инженеров и студентов втузов. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1979. 408 с.
9. *Вадутов, О. С.* Математические основы обработки сигналов : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. С. 35.
10. *Александрова, М. Е.* Задача фильтрации сигнала на основе предварительного подавления не выделяемых гармоник // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2017. № 12. С. 30–34.
11. *Вертунов, А. А.* Исследование триггера с эмиттерной связью / А. А. Вертунов, Д. А. Цуркан // Молодой ученый. 2015. № 4. С. 142–145.
12. *Титце, У.* Полупроводниковая схемотехника : справ. руководство : пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. М. : Мир, 1982. 512 с.
13. *Хоровиц, П.* Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 2 : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Мир, 1993. 371 с.
14. *Микушин, А. В.* Цифровые устройства [Электронный ресурс] // DigTeh, Россия [Сайт]. URL: <http://dighteh.ru/digital/> (дата обращения: 16.07.2019).

*M. E. Alexandrova, specialist*

E-mail: [aleksandrova98m@mail.ru](mailto:aleksandrova98m@mail.ru)

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russian Federation

### **Formation of Signals in Digital Power Amplifiers Using the Redistribution of Energy in the Spectrum of a Pulse Sequence**

*This paper presents methods for generating impulse signals using the spectrum redistribution of an impulse sequence also the methods of adaptation of the a system with the help of which, under the influence of distortions in the construction of the system, the spectrum is kept close to the theoretical.*

**Keywords:** spectrum, amplifier, impulse, harmonic, kcoefficient, amplitude.

---

УДК 681.5.073

Г. Д. Бабошкин, аспирант  
E-mail: gbaboshkin@gambler.ru

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

### **Преимущества дробных автоматических систем управления объектами, обладающими высокой инерцией**

*В работе рассматривается проблема достижения высокого качества управления системы с объектом, имеющим высокую инерционную составляющую. Моделирование системы стабилизации с классическим ПИД-регулятором показало, что она не позволяет достичь требуемого качества управления (большое время установления переходного процесса при требуемом перерегулировании). Выдвинута гипотеза, что ПИД-регулятор дробного порядка (ФПИД-регулятор) позволит достичь требуемого качества управления. Произведено математическое моделирование системы с ФПИД-регулятором. Выявлено, что ФПИД-регулятор позволяет значительно уменьшить время установления переходного процесса исследуемой системы.*

**Ключевые слова:** автоматическая система управления, ПИД-регулятор дробного порядка, высокоинерционный объект управления.

#### **Введение**

В большинстве отраслей промышленности пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы использовались в течение нескольких десятилетий для управления процессами. Причина их широкой популярности заключается в простоте схемотехнического исполнения и динамических характеристиках, обеспечивающих низкий процент перерегулирования и малое время установления инерционных объектов [1].

В то же время растет число исследований, связанных с проектированием и применением во многих областях науки и техники ПИД-регуляторов дробного порядка, или ФПИД-регуляторов [2–5]. Особенностью ФПИД-регулятора является то, что кроме классических коэффициентов управления  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$  в уравнении передаточной функции контроллера появляются параметры  $\lambda$  и  $\delta$ , определяющие соответственно порядок интегрирования и дифференцирования ФПИД-регулятора.

ФПИД-регулятор обеспечивает систему автоматического управления следующими преимуществами [6]:

- отсутствует или очень мала статическая ошибка системы;

- высокий запас по фазе и амплитуде системы управления;
- высокая помехоустойчивость системы;
- устойчивость к внешним возмущениям объекта управления;
- высокая чувствительность к сигналу ошибки системы благодаря увеличенному числу параметров настройки ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ,  $\lambda$ ,  $\delta$ ).

Однако в отечественной литературе слабо отражены вопросы применения и проектирования ФПИД. Можно отметить работы, исследования которых были направлены на увеличение чувствительности работы ПИД-регулятора за счет реализации дробного дифференцирования и интегрирования, такие как ПИД-регулятор с добавочными И- и Д-звеньями [2], ЛИД-регулятор [3] и ПИД-регулятор дробного порядка, реализованный на дискретных элементах [4, 5]. Это связано с тем, что теория дробных исчислений не получила пока широкого распространения в инженерной среде: нет достаточно универсальных методик проектирования ФПИД-регуляторов, а также с тем, что отсутствует элементная база, позволяющая выполнять операции дробного аналогового дифференцирования и интегрирования без усложнения схемотехнического исполнения регулятора.

Целью данной работы является моделирование системы управления объектом с высокой инерцией, используя классический ПИД-регулятор и ФПИД-регулятор, сравнение достигнутых показателей управления этих систем.

### Сведения из теории

Представим объект управления в виде синхронной машины с маховиком, создающим высокий маховый момент на вал двигателя.

Классическое выражение для передаточной функции двигателя в комплексно-частотной области определяется выражением:

$$W(p) = \frac{K}{T_3 T_j s^2 + T_j s + 1}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент передачи двигателя;  $T_3$  – электромагнитная постоянная времени двигателя, с;  $T_j$  – электромеханическая постоянная времени, с [7].

Электромеханическая (инерционная) постоянная определяет время нарастания кривой разгона двигателя до ее асимптоты. То есть если  $K$  определяет коэффициент передачи по скорости двигателя, рад/с, то  $T_j$  – время разгона двигателя до его максимальной скорости. Для наглядности примем электромеханическую составляющую большим значением, например:

$$T_j = 21,372 [c]$$

Электромагнитная постоянная двигателя определяет время нарастания тока якоря до установившегося значения и определяется по формуле

$$T_\beta = \frac{L_\alpha}{R_\alpha} = \beta \cdot \frac{U_\alpha}{2\pi f_{\text{ном}} \cdot I_\alpha} \cdot \frac{1}{R_\alpha} = \frac{\beta}{2\pi f_{\text{ном}}} = 1,19 \cdot 10^{-4} [c],$$

где  $f_{\text{ном}} = 400$  Гц – рабочая частота двигателя;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности согласно приближенной формуле Уманского (принимается равным 0,3 для расчета двигателя с компенсацией) [7].

Максимальную скорость вращения двигателя примем за 3000 об/мин (312 рад/с).

Таким образом, условная передаточная функция двигателя с высокой инерцией по скорости определяется выражением:

$$W(p) = \frac{K}{T_\beta T_j s^2 + T_j s + 1} = \frac{312}{0,003s^2 + 21,372s + 1} \quad (2)$$

Для принятой передаточной функции объекта управления промоделируем системы с классическим ПИД-регулятором и ФПИД-регулятором. В качестве основных критериев управления примем перерегулирование не более 10 % и запас по фазе не менее  $50^\circ$  и произведем сравнительную оценку остальных параметров переходной функции и ЧХ.

Суть процесса моделирования ФПИД-регулятора, как и для классической цепи, заключается в расчете коэффициентов регулирования для исследуемого объекта управления. Расчет коэффициентов осуществлялся с помощью имеющихся программных средств, исходными данными для которых является передаточная функция объекта управления системы, которую в первую очередь и необходимо было получить.

## Описание эксперимента

### 1. Оптимизация коэффициентов классического ПИД-регулятора

Для расчета коэффициентов классического ПИД-регулятора был использован встроенный оптимизатор коэффициентов управления «PIDTuning» в программе MatLabR20120b.

Данный оптимизатор удобен тем, что он позволяет настроить коэффициенты регулирования по требуемым характеристикам АЧХ системы и ее временным характеристикам. В качестве исходных данных оптимизатору необходима передаточная функция объекта управления, заданная функцией «tf» (передаточная функция) в MatLab.

Оптимизатор предлагает на выбор две схемы ПИД-регулятора: классическую (звенья регулятора включены параллельно) схему регулятора и последовательную (пропорциональное звено влияет на коэффициент передачи И- и Д-звена). Так как на данный момент существует только параллельная реализация ФПИД-регулятора, для более достоверной оценки результатов моделирования выберем параллельную схему и для классического ПИД-регулятора.

Настройка ПИД-регулятора показала, что САУ с требуемым перерегулированием имеет большое время установления переходного процесса, а при уменьшении времени установления САУ – растет перерегулирование. Переходные характеристики полученных моделей САУ представлены на рис. 1, сравнительные характеристики САУ – в табл. 1.

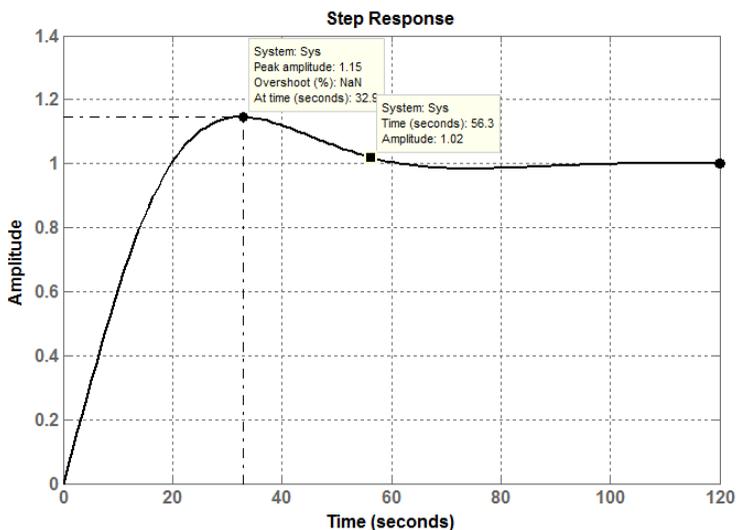


Рис. 1. Переходная характеристика САУ с классическим ПИД-регулятором

Таблица 1. Характеристики полученных моделей САУ

| $K_i$                | $K_p$ | Полоса пропускания, Гц | Частотный коэффициент колебательности | Перерегулирование, % | Время установления, с | Запас по фазе |
|----------------------|-------|------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| $57,9 \cdot 10^{-5}$ | 0,004 | 5,49                   | 1.15                                  | 15                   | 56,3                  | $60^\circ$    |

$K_d$  равен 0. Для выбранного объекта управления очевидна проблема: применение классического ПИД-регулятора не позволяет одновременно

уменьшить перерегулирование системы и время установления ее переходного процесса.

Далее представлен процесс моделирования САУ с ФПИД-регулятором.

## 2. Оптимизация коэффициентов ФПИД-регулятора

Для расчета коэффициентов ФПИД-регулятора использовалась программа оптимизации на базе генетического алгоритма, реализованная в MatLab, как описано в [8]. Внешний вид окна программы изображен на рис. 2.

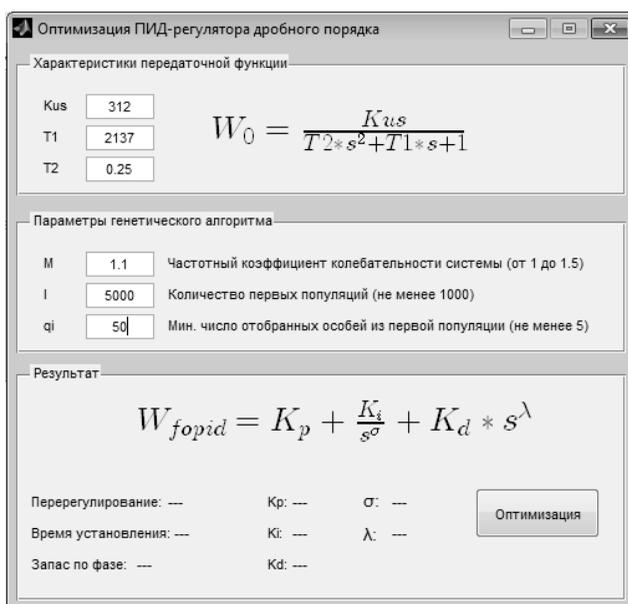


Рис. 2. Внешний вид окна программы оптимизации коэффициентов ФПИД-регулятора

В качестве исходных данных программа использует коэффициенты передаточной функции объекта управления из уравнения вида (1). В качестве критерия оптимальности пользователь самостоятельно задает частотный коэффициент колебательности (ЧКК), характеризующий перерегулирование переходного процесса. Точность оптимизации настраивается за счет задания количества первых популяций генетическо-

го алгоритма и минимального числа отобранных особей в результате первой селекции.

С целью уменьшения времени установления переходного процесса, в программе вычисляется интегральное квадратичное отклонение САУ, используемое в качестве еще одного критерия оптимальности. Таким образом, оптимальными принимаются коэффициенты ФПИД-регулятора, при которых интегральное квадратичное отклонение сводится к минимуму, а ЧКК – к требуемому значению. Обоснование выбора критериев оптимизации коэффициентов и решения, принятые для реализации представленного программного обеспечения, представлены в работе [9].

В качестве результатов программа выдает коэффициенты управления ФПИД-регулятора, характеристики качества управления: перерегулирование, запас по фазе, время установления переходного процесса, а также строит графики переходной характеристики, диаграммы Боде открытого контура САУ и закрытого, а также годографа САУ для более точного анализа характеристик управления.

Результирующие ЧХ замкнутой САУ исследуемым объектом управления изображены на рис. 3, а ее переходная характеристика – на рис. 4.

Результаты оптимизации:

Коэффициенты П-, И-, Д-звеньев:  $Kp = 0,677$ ;  $Ki = 1,979$ ;  $Kd = 0,038$ .

Порядки И- и Д-звеньев, соответственно  $\sigma = 0,905$ ,  $\lambda = 0,249$ .

Полоса пропускания: 607 Гц.

ЧКК: 1,12.

Перерегулирование: 12,8 %.

Время установления: 1,07 сек.

Запас по фазе:  $77^\circ$ .

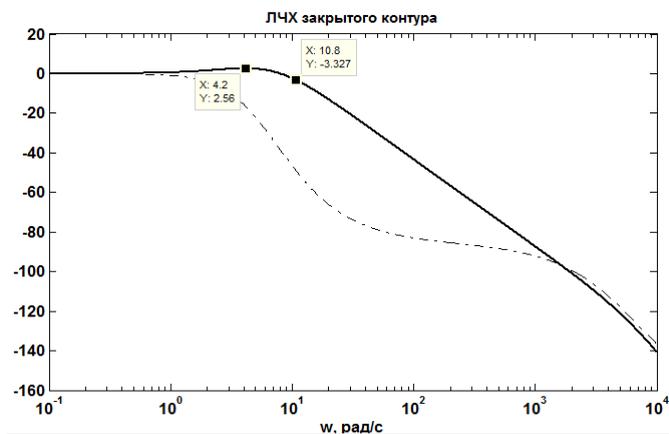


Рис. 3. ЧХ САУ с ФПИД-регулятором

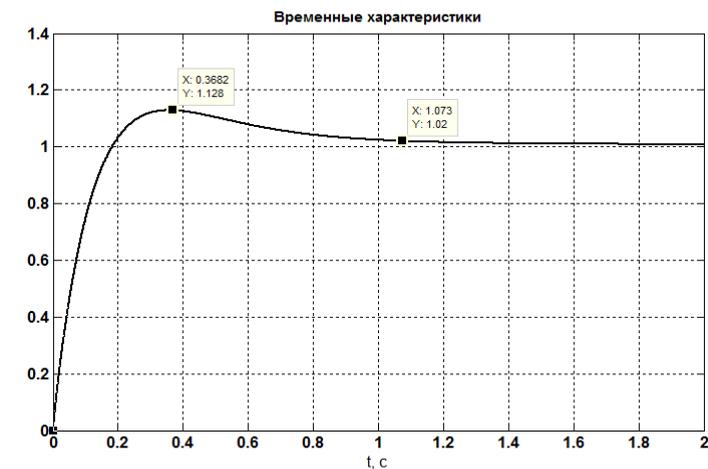


Рис. 4. Переходная характеристика САУ с ФПИД-регулятором

Полученная математическая модель САУ полностью удовлетворяет заданным требованиям. Очевидно, что при требуемом перерегулировании ФПИД-регулятор позволяет обеспечить переходный процесс САУ меньшим временем установления, чем классический ПИД-регулятор.

## Вывод

Результаты проведенного моделирования и сравнения показателей САУ с классическим ПИД-регулятором и с ФПИД-регулятором показали, что ФПИД-регулятор позволяет улучшить качество управления САУ объектами, обладающими высокой инерцией, по сравнению с классическим ПИД-регулятором. Это является еще одним доказательством актуальности и эффективности использования ФПИД-регуляторов в САУ.

## Список литературы

1. ASTROM.K.J. HAGGLUND.T.: The Future of PID Control, in IF AC Workshop on Digital Control. Past. Present and Future of PID Control. (Terrassa. Spain). April 2000. Pp. 19-30
2. Способ управления температурным режимом теплицы : пат. 2589163 RU / Судник Ю. А., Лазаренко Л. М., Лазаренко М. Л.
3. Boris J. Lurie. Three-parameter tunable tilt-integral-derivative (TID) controller. Patent US 5371670 A, USA. 1993.
4. Жмудь, В. О нецелесообразности применения дробно-степенных ПИД-регуляторов / В. Жмудь, А. Заворин // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 6–21
5. Kempfle S., Schaefer I. Fractional Models of Loudspeaker Coils // Proc. Of 2nd IF AC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications (Porto, Portugal, July 19-21). Porto: 2006. Pp. 111-114.
6. Podlubny I., Dorcak L. and Kostial I. On fractional derivatives, fractional-order dynamic system and PIXDu –controllers. Proc. Of the 36th IEEE CDC. San Diego. 1997. DOI: 10.1109/CDC.1997.649S41
7. Шелтинг, Г. Электрические машины / Г. Шелтинг, А. Байссе. М. : Энергоатомиздат, 1991. 229с.
8. 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. научно-практ. конф. (5 мая 2018 г, г. Казань) : в 2 ч. Ч 1. Уфа : АЭТЕРНА, 2018. С. 8–10.
9. Бабошкин, Г. Д. Выбор критериев качества управления АСУ для автоматизированной оптимизации параметров ПИД-регулятора дробного порядка [Электронный ресурс]: / Г. Д. Бабошкин, П. А. Ушаков, М. А. Подсизерцев // «Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства» сб. материалов XIV Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 12–14 дек. 2018 г.). Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. С. 30–37. 8,6 МБ (PDF). Систем. требования: Acrobat Reader 6.0 и выше. ISBN 978-5-7526-0810-0

---

G. D. Baboshkin, postgraduate student  
E-mail: g1baboshkin@rambler.ru  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **The Advantages of Fractional Automatic Control Systems for Objects with High Inertia**

*The paper deals with the problem of achieving a high quality control system with an high inertial object. Simulation of the stabilization system with the classical PID-controller showed that it does not allow to achieve the required control quality (a long time to establish the transition process, with the required overshoot). It has been hypothesized that a fractional-order PID-controller (FOPID-controller) will achieve the required control quality. Produced mathematical modeling of the system with FOPID-controller. It was revealed that the FOPID-controller can significantly reduce the time to establish the transition process of the system under study.*

**Keywords:** automatic control system, fractional order PID-controller, high inertia control object.

УДК 004.4: 621.317 (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*, младший научный сотрудник

E-mail: soyp2013@yandex.ru

*Ю. Н. Черенков*, ведущий инженер

E-mail: yuri\_cherenkov@mail.ru

*Ю. Т. Загидуллин*, старший преподаватель

E-mail: zagidullinyut@mail.ru

*А. А. Симушин*, старший преподаватель

E-mail: hobnab@istu.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Программно-аппаратный комплекс для имитации радиоэлектронного противодействия работе средств связи**

*Статья посвящена программно-аппаратному комплексу на базе технологии «интернет вещей». Данный комплекс разработан в виде системы удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой компании Rohde & Schwarz и оборудования компании National Instruments при использовании среды разработки и платформы для выполнения программ – LabVIEW. Комплекс позволяет проводить моделирование воздействия на работу радиоприемных устройств в условиях преднамеренных помех. Имитация помех осуществляется с помощью контрольно-измерительной аппаратуры компании Rohde & Schwarz.*

**Ключевые слова:** удаленное управление, контрольно-измерительная аппаратура, LabVIEW, Rohde & Schwarz, National Instruments, радиоэлектронное подавление.

#### **Введение**

В настоящее время средства радиоэлектронной защиты и радиоэлектронного подавления бурно развиваются. При их разработке используются все новейшие достижения науки, что впоследствии способствует развитию наукоемкой отрасли. С появлением новых комплексов радиоэлектронного подавления начинается работа по разработке средств радиоэлектронной защиты от данного нового комплекса. Также возможна

и иная ситуация, когда новому средству радиоэлектронной защиты создают новый комплекс подавления, противостоящий ему [1].

Актуально в настоящее время изучение вопроса радиоэлектронной борьбы (РЭБ) в информационном противоборстве, средствах радиосвязи (СРС) с помощью компьютерного и программно-аппаратного моделирования. Компьютерное моделирование может проводиться в среде имитационного моделирования Simulink, которая входит в математический пакет программ Matlab. Программно-аппаратное моделирование проводится с помощью программно-аппаратного комплекса, который разработан на базе контрольно-измерительной аппаратуры компании Rohde & Schwarz и оборудования компании National Instruments.

В статье представлена структура разработанного программно-аппаратного комплекса для имитации радиоэлектронного противодействия работе средств связи, а также представлены результаты программно-аппаратного моделирования работы средств связи в условиях радиоэлектронного противодействия.

### **Удаленное управление контрольно-измерительной аппаратурой и оборудованием**

Создание локальных вычислительных сетей и формирование на их основе корпоративных сетей, как следствие появление глобальной сети Интернет – все это открыло широкие возможности по взаимодействию различных структур между собой. Перспектива такого взаимодействия проявилась в появлении такого понятия, как «интернет вещей» (IoT, Internet of Things) [2].

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 [3].

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.

LabVIEW – программа в комплексе с измерительными приборами, подключаемыми к компьютеру через стандартные интерфейсы RS-232, RS-485, USB, GPIB, Ethernet, PXI, VXI, которая позволяет разрабаты-

вать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности [4].

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 приемо-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 [5].

На рис. 1 представлена структурная схема программно-аппаратного моделирования радиоэлектронного противодействия работе радиосредств связи.

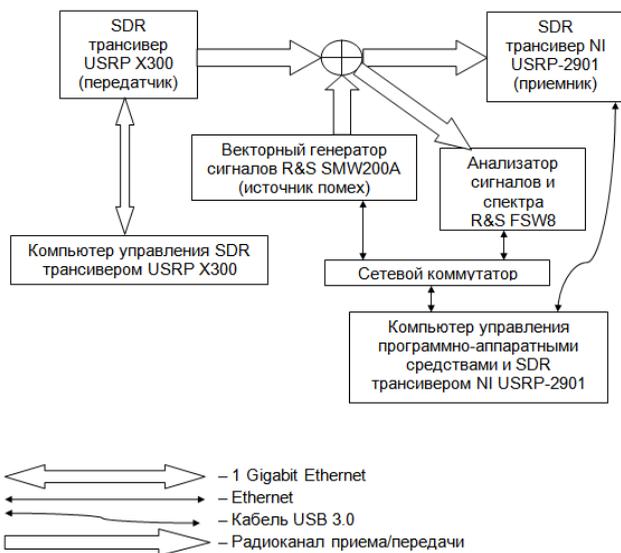


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для моделирования радиоэлектронного противодействия работе средств связи

В состав программно-аппаратного комплекса входят универсальный SDR-трансивер USRP X300 и SDR-трансивер NI USRP-2901 (оборудования National Instruments), векторный генератор сигналов R&S SMW200A, анализатор сигналов и спектра R&S FSW8 (контрольно-измерительная аппаратура компании Rohde & Schwarz), сетевой коммутатор, компьютер управления SDR-трансивером USRP X300, компьютер управления программно-аппаратными средствами и SDR-трансивером NI USRP-2901.

Рассмотрим назначение каждого прибора и оборудования. Так, например, с помощью универсального SDR-трансивера USRP X300 служит для имитации радиопередатчика. С помощью компьютера управления SDR-трансивером USRP X300 осуществляется удаленное управление и настройка соответствующего SDR-трансивера при использовании программы удаленного управления USRP X300, которая позволяет осуществить настройку трансивера для передачи записи радиосигнала по радиоэфиру. Данная программа разработана в среде разработки LabVIEW.

В качестве приемника в программно-аппаратном комплексе используется SDR трансивер NI USRP-2901. Трансивер NI USRP-2901 как USRP X300 также можно удалено управляет, и осуществлять его настройку с помощью компьютера управления программно-аппаратными средствами и SDR трансивером NI USRP-2901 и разработанной программы удаленного управления данным трансивером. Программа позволяет проводить настройку трансивер NI USRP-2901 в режим приема сигнала, а также позволяет осуществлять запись принимаемого радиоэфира.

Аудиозапись радиоэфира обрабатывается с помощью программы Cool Edit Pro 2.1. В данной программе осуществлялось выделение сигнала, в данном случае OFDM-сигнала, из всего записанного радиоэфира и перенос его на другую частоту дискретизации по причине того, что во время записи радиоэфира SDR-трансивер NI USRP-2901 сдвигает сигнал по частоте.

Демодуляция принимаемого сигнала осуществляется в заранее подготовленной программе демодулятора OFDM-сигнала, написанной в математическом пакете MatLAB R2017a.

Также с помощью компьютера управления программно-аппаратными средствами и SDR-трансивером NI USRP-2901 и разработанных программ удаленного управления можно удаленно управлять векторным генератором сигналов R&S SMW200A и анализатором сигналов и спектра R&S FSW8.

Векторный генератор сигналов R&S SMW200A предназначен для имитации работы станции радиоэлектронного подавления (передатчика помех), а также позволяет имитировать воздействие естественных шумов, а именно аддитивного белого гауссовского шума, на прохождение радиосигнала в канале связи.

Анализатор сигналов и спектра R&S FSW8 позволяет посмотреть спектр передаваемых сигналов на конкретной частоте и заданной полосе отображения, что позволяет оценить уровень передаваемых сигналов, шумов и помех. Настройка данного прибора осуществляется с помощью соответствующего компьютера управления по интерфейсу Ethernet и программы удаленного управления. В программе удаленного управления R&S FSW8 позволяет не только настроить прибор на отображения спектра на заданной частоте и полосе обзора, но и оценить уровень сигнала и шума. Данный прибор в составе программно-аппаратного комплекса для моделирования воздействия естественных и преднамеренных помех на работу радиолинии имитирует работу радиолокационной станции.

Сетевой коммутатор – устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов компьютерной сети в пределах одного сегмента [6, 7].

### **Результаты программно-аппаратного моделирования работы радиолинии в условиях радиоэлектронного противодействия**

**Влияние помехи в виде тонального гармонического сигнала на процесс передачи аудиофайла.** Помеха, в нашем случае тональный гармонический сигнал, формируется с помощью векторного генератора сигналов R&S SMW200A с помощью заранее подготовленной программы удаленного управления векторным генератором сигналов R&S SMW200A. При этом уровень OFDM-сигнала фиксирован и составляет 5 дБм (задается в программу для передачи аудиофайла). Полученные результаты исследования влияния помех на процесс передачи аудиофайла приведены в табл. 1.

*Таблица 1. Значение вероятности ошибки на бит при воздействии помехи в виде тонального гармонического сигнала на процесс передачи OFDM-сигнала*

|                     |       |       |        |        |        |        |        |
|---------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Уровень помехи, дБм | 0     | 5     | 0      | 15     | 20     | 25     | 30     |
| $P_{\text{ошб}}$    | 0,064 | 0,154 | 0,2414 | 0,3806 | 0,9390 | 0,4935 | 0,5008 |

График зависимости вероятности ошибки на бит от уровня помехи в виде тонального гармонического сигнала приведен на рис. 2.

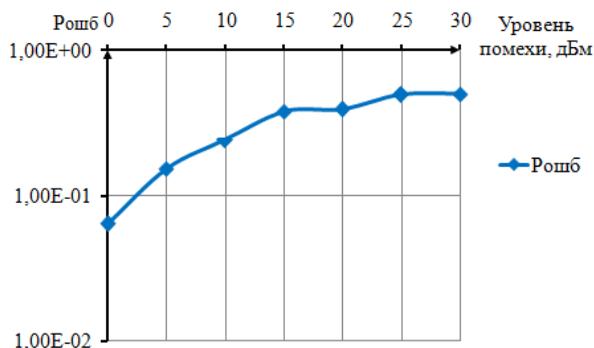


Рис. 2. График зависимости вероятности ошибки на бит от уровня помехи в виде тонального гармонического сигнала

Из рис. 2 видно, что с увеличением уровня помехи по мощности увеличивается вероятность битовой ошибки. Также важно отметить, что при уровне помехи равной 5 дБм вероятность битовой ошибки составляет 0,154. Это говорит о том, что система связи, которая использует сигнал OFDM, подавлена в результате воздействия помехи.

**Влияни помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала на процесс передачи аудиофайла.** Помеха формируется с помощью векторного генератора сигналов R&S SMW200A. При этом уровень OFDM-сигнала фиксирован и составляет 10 дБм. Полученные результаты исследования влияния помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала на процесс передачи аудиофайла приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значение вероятности ошибки на бит при воздействии помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала на процесс передачи OFDM-сигнала

| Уровень помехи, дБм | -30    | -25   | -20    | -15    | -10    | -5     | 0      |
|---------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $P_{\text{ошиб}}$   | 0,0054 | 0,065 | 0,1422 | 0,5013 | 0,5014 | 0,4935 | 0,5008 |

График зависимости вероятности ошибки на бит от уровня помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала приведен на рис. 3.

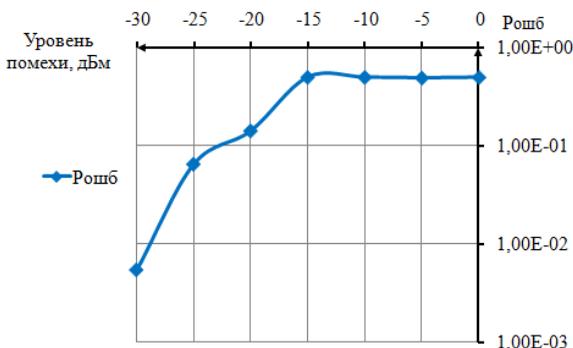


Рис. 3. График зависимости вероятности ошибки на бит от уровня помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала

При воздействии помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала, уровень которой составляет от минус 15 до 0 дБм, на сигнал OFDM в процессе демодуляции происходит сбой кадровой синхронизации. Сбой кадровой синхронизации говорит о том, что система связи подавлена воздействием помехи в виде аналогового ЧМ-сигнала. Также можно сказать, что система связи будет подавлена при уровне помехи, равной минус 20 дБм, т. к. вероятность битовой ошибки составляет  $P_{\text{ошб}} = 1,422 \cdot 10^{-1}$ .

### Вывод

В работе приведен программно-аппаратный комплекс удаленного управления контрольно-измерительной аппаратурой Rohde & Schwarz с помощью LabVIEW. Разработанный программно-аппаратный комплекс для имитации радиоэлектронного противодействия работе средств связи позволяет учитывать физические характеристики реальных приемопередающих трактов средств связи и каналов связи. В качестве источника сигнала можно использовать универсальный программируемый трансивер и/или исследуемые радиостанции. Комплекс построен на базе контрольно-измерительной аппаратуры компаний Rohde & Schwarz и National Instruments.

С помощью комплекса проведено моделирование для оценки устойчивости сигналов OFDM к воздействию помех: тонального и аналогового ЧМ-сигнала. Показано, что более сильное воздействие оказывает ЧМ-помеха, чем тональная. Например, для ЧМ-помехи при уровне помех, равном 0 дБм, вероятность ошибки на бит составляет  $P_{\text{ошб}} = 0,5008$ , а для тональной помехи –  $P_{\text{ошб}} = 0,064$ . Обнаружено, что ЧМ-

помеха приводит к сбою кадровой синхронизации при демодуляции OFDM-сигнала.

*Исследование выполнено в рамках проекта № 11.06.01/18ХВВ.*

#### Список литературы

1. *Куприянов, А. И.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. М. : Вуз. кн., 2011. 800 с. : ил.
2. *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.
3. *Росляков, А. В.* Интернет вещей : учеб. пособие / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. Самара : ПГУТИ, 2015. 200 с.
4. *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.
5. Построение системы контроля и тестирования радиосистем как элемента IoT / В. В. Хворенков, Р. А. Хатбуллин, А. И. Нистюк, А. А. Зыкин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 3. С. 155–165.
6. *Хворенков, В. В.* Автоматизированное рабочее место главного конструктора радиоэлектронных средств на основе теории многоагентных систем / В. В. Хворенков, И. С. Батулин, А. В. Савельев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20, № 4. С. 77–81.
7. *Копысов, А. Н.* Измерительный стенд для записи сигналов с широкополосной несущей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2006. № 1 (29). С. 57–60.

*Boyarshinov, M.A.*, cand. in tech. sci., assoc. prof.

E-mail: mabkb@istu.ru

*Khatbullin, R.A.*, cand. in tech. sci., assoc. prof.

E-mail: rxn3110c@rambler.ru

*Zykin, A.A.*, junior research fellow

E-mail: soyp2013@yandex.ru

*Cherenkov, Y.N.*, principal engineer

E-mail: yuri\_cherenkov@mail.ru

*Zagidullin, Y.T.*, senior lector

E-mail: zagidullinyut@mail.ru

*Simushin A.A.*, senior lector

E-mail: hobnab@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

### **Hardware-Software Complex with the Purpose of Simulation Jamming Support Communication Activity**

*The article deals with the hardware-software complex powered by Internet of things. This complex engineered in system type remote control instrumentation equipment companies Rohde & Schwarz and equipment companies National Instruments using a programming environment and platform for implementation software programme – LabVIEW. The complex enable perform simulation impact on the work of the radio communication circuit naturally occurring and jamming signal. Imitation jamming is accomplished by means of instrumentation equipment companies Rohde & Schwarz.*

**Keywords:** remote control, control instrumentation, LabVIEW, Rohde & Schwarz, National Instruments, jamming.

*This investigations was funded to the research project No. 11.06.01/18XBB.*

---

УДК 621.372.51

*Б. П. Верба*, аспирант

E-mail: i412767438@yandex.ru

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доцент

E-mail: shishakovk@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

### **Экспериментальное исследование влияния вариантов развертывания V-антенны на эффективность радиосвязи в ближней зоне на частотах вблизи 4,7 МГц**

*В статье рассмотрена проблема ведения КВ-радиосвязи в ближней зоне. Предложены варианты развертывания антенн для повышения эффективности радиоканала в КВ-диапазоне. Выполнено компьютерное моделирование антенн, учитывая вариации развертывания, для получения электрических параметров, в частности коэффициента усиления. Также в статье отражены результаты реальных измерений уровней сигнала при использовании антенн различных типов.*

**Ключевые слова:** КВ-диапазон, ближняя зона, V-антенна, связь, повышение эффективности.

#### **Введение**

Основным преимуществом мобильной КВ-радиосвязи является возможность работы на загоризонтных радиотрассах (т. е. вне зоны прямой видимости). Такое распространение коротких волн достигается благодаря их отражению от ионосферы. Ионосферные волны за счет однократного или многократного отражения от ионосферы при благоприятных условиях могут распространяться на сколь угодно большие расстояния. Их основное свойство состоит в том, что они слабо поглощаются нижними слоями ионосферы и хорошо отражаются ее верхними слоями. Это дает возможность использовать относительно маломощные радиостанции для ведения прямой связи в неограниченно широком диапазоне расстояний [1].

Кроме этого, в условиях горной и пересеченной местности (при нарушении условий прямой видимости) КВ-радиостанции позволяют обеспечить надежную радиосвязь в ближней зоне. Например, с ближайшими населенными пунктами, экспедициями, поисковыми и разведывательными партиями и т. д. [2]. Местная связь особенно необходима во время стихийных бедствий, чрезвычайных ситуаций, военных действий, т. к. телефонная сотовая связь покрывает лишь небольшую часть

территорий, а ее базовые станции часто выходят из строя при чрезвычайных ситуациях. Заметим, что дальность действия УКВ-радиостанций ограничена дальностью прямой видимости, т. е. 10–15 километров [1].

Для обеспечения радиообмена в ближней зоне в КВ-диапазоне применяют так называемые NVIS-антенны (*Near Vertical Incidence Skywave*), что дословно переводится как «волна, практически вертикального падения» [3]. Такой способ развертывания антенны предусматривает работу пространственной волной, падающей на ионосферный слой почти вертикально и отражающейся тоже почти вертикально вниз, создавая значительную напряженность поля на небольших расстояниях (десятки-сотни километров) от передатчика.

### **Исследование проблемы**

На практике в качестве NVIS-антенны чаще всего применяется антенна типа «Inverted-V» или «V-обратная» [3]. Экспериментальное исследование эффективности разных вариантов ее развертывания в режиме работы в ближней зоне на частотах вблизи 4,7 МГц является целью настоящей статьи.

Для исследования эффективности вариантов развертывания антенн была выбрана радиотрасса п. Смолино – п. Ягул (дистанция 55 км), картографически показанная на рис. 1.

В качестве антенн абонентов использовались антенны «наклонный луч» с длиной плеча 8 метров, развернутые по варианту «Inverted-V». Питание подводилось через 15-метровый фидер, согласование антенны осуществлялось через автоматическое согласующее антенное устройство, установленное наверху мачт. Схематичное изображение используемых антенн показано на рис. 2, вид диаграммы направленности, полученный в результате моделирования антенны в программном пакете MMANA-Gal, представлен на рис. 3. Коэффициент усиления, полученный в результате моделирования данной антенны, по углу места  $90^\circ$  составляет 7,6 дБи.

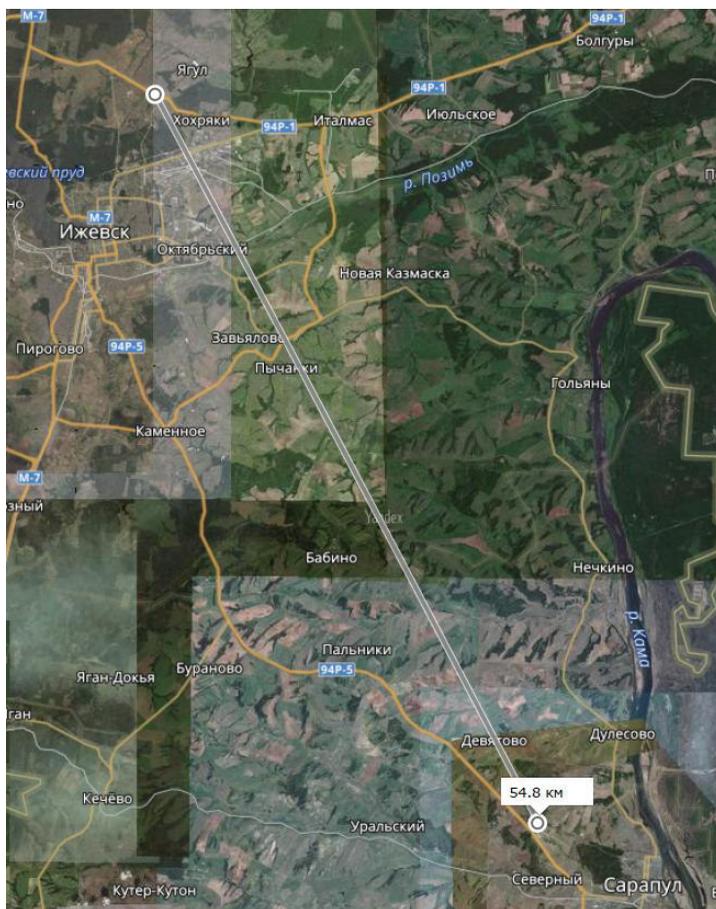


Рис. 1. Картографическое отображение исследуемой радиотрассы

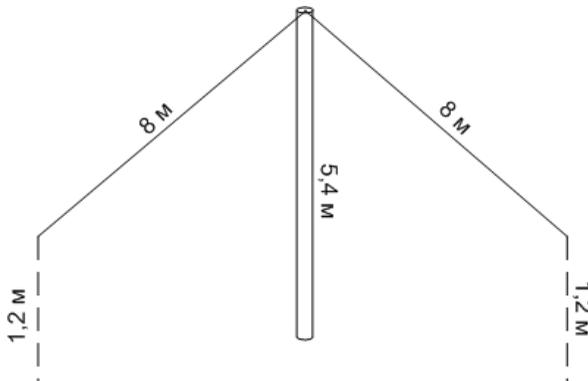


Рис. 2. Внешний вид исследуемой антенны

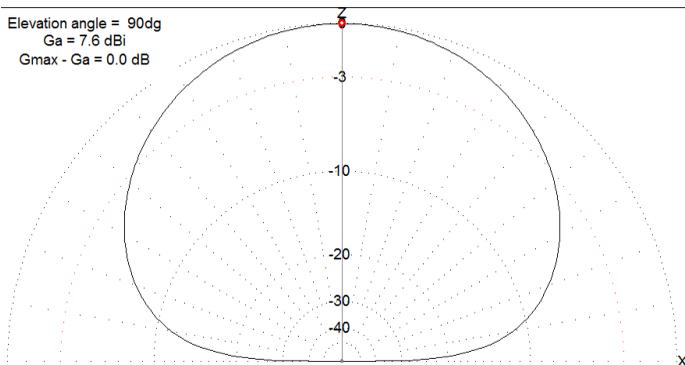


Рис. 3. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости исследуемой антенны

Затем были проведены измерения реальных уровней сигнала с использованием антенн данного типа. Абонент, находящийся в районе п. Смолино, выходил в режим передачи с классом излучения A1A (амплитудный телеграф), абонент, находящийся в п. Ягул проводил измерения с помощью портативного анализатора спектра. Частоты взаимодействия абонентов были подобраны с учетом прогнозирования прохождения радиоволн. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Полученные результаты измерений

| Частота, МГц | Измеренный уровень полезного сигнала (среднее значение), дБм | Измеренный уровень эфирного шума (среднее значение), дБм | Соотношение сигнал/шум, дБ |
|--------------|--|--|----------------------------|
| 4,825        | минус 96,3   | минус 111,6  | 15,3                       |
| 4,725        | минус 94   | минус 111,5  | 17,5                       |
| 4,531        | минус 91   | минус 107,1  | 16,1                       |

Как показала практика, полученных соотношений сигнал/шум достаточно для ведения аналоговой телефонной и телеграфной связи, но недостаточно для цифровых режимов и режимов передачи данных. Для исследования методов улучшения качества связи был промоделирован вариант развертывания антенны с установкой под антенной 6 противовесов длиной 8 метров каждый. Внешний вид антенны в данном варианте развертывания представлен на рис. 4, вид диаграммы направленности, полученный в результате моделирования в программном пакете MMANA-Gal, представлен на рис. 5. Коэффициент усиления, полученный в результате моделирования данной антенны, по углу места  $90^\circ$  составляет 13,8 дБи.

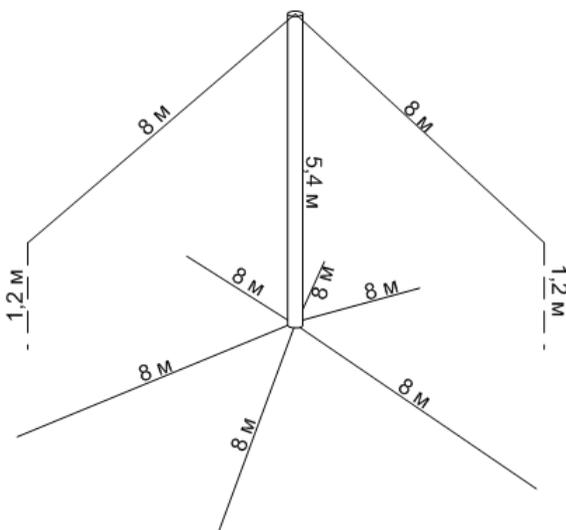


Рис. 4. Внешний вид исследуемой антенны

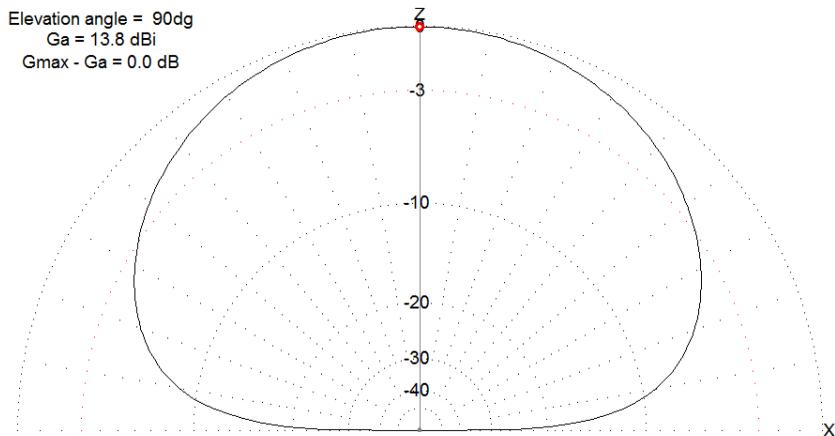


Рис. 5. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости исследуемой антенны

Результат моделирования показал значительное увеличение коэффициента усиления антенны по углу места  $90^\circ$  по сравнению с классическим вариантом развертывания. После добавления противовесов к антенне, были повторно проведены измерения реальных уровней сигналов по той же методике. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Полученные результаты измерений

| Частота, МГц | Измеренный уровень полезного сигнала (среднее значение), дБм | Измеренный уровень эфирного шума (среднее значение), дБм | Соотношение сигнал/шум, дБ |
|--------------|--|--|----------------------------|
| 4,825        | минус 86,7   | минус 112  | 25,3                       |
| 4,725        | минус 88,7   | минус 111,7  | 23                         |
| 4,531        | минус 83,2   | минус 109,2  | 26                         |

Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование противовесов положительно влияет на практическую организацию связи.

Дополнительно исследован вариант развертывания антенны, в котором предусматривается поднятие концов излучающего полотна над поверхностью земли на высоту 5 м. Внешний вид антенны в данном варианте развертывания представлен на рис. 6, вид диаграммы направленности, полученный в результате моделирования, представлен на рис. 7.

Коэффициент усиления, полученный в результате моделирования данной антенны, по углу места  $90^\circ$  составляет 9,8 дБи.

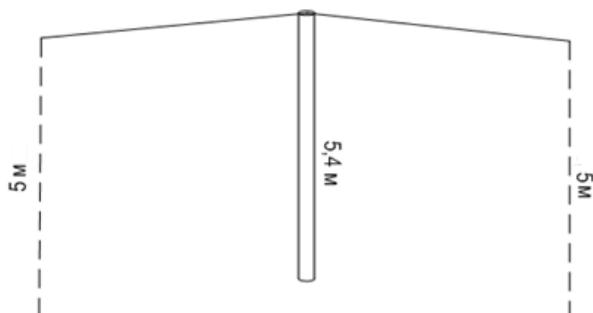


Рис. 6. Внешний вид исследуемой антенны

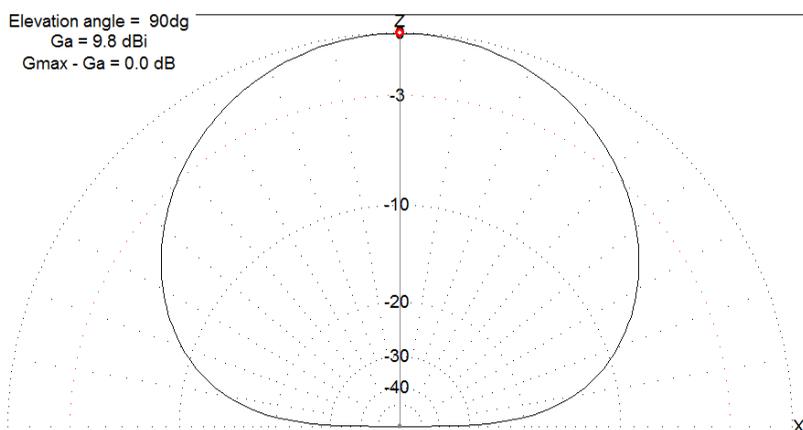


Рис. 7. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости исследуемой антенны

Результат моделирования показал увеличение коэффициента усиления по сравнению с классическим вариантом разворачивания, но полученное значение все же было меньше, чем в варианте с классической антенной с установленными противовесами. Для получения практических результатов проведены измерения уровней сигналов по той же методике, результаты измерений занесены в табл. 3.

Таблица 3. Полученные результаты измерений

| Частота работы, МГц | Измеренный уровень полезного сигнала (среднее значение), дБм | Измеренный уровень эфирного шума (среднее значение), дБм | Соотношение сигнал/шум, дБ |
|---------------------|--|--|----------------------------|
| 4,825               | минус 87,6   | минус 110  | 22,4                       |
| 4,725               | минус 90,3   | минус 112,8  | 22,5                       |
| 4,531               | минус 84,4   | минус 108,8  | 24,4                       |

Из полученных результатов можно сделать вывод, что поднятие концов излучающих полотен над поверхностью земли дает практически такой же положительный эффект, как использование противовесов.

Для исследования максимально эффективного способа ведения радиосвязи в КВ-диапазоне в ближней зоне, исследован комбинированный вариант, в котором предусматривается поднятие концов излучающего полотна над поверхностью земли на высоту 5 м, а также установка под излучающее полотно антенны 6 противовесов по 8 метров каждый. Внешний вид антенны в данном варианте развертывания представлен на рис. 8, вид диаграммы направленности, полученный в результате моделирования, представлен на рис. 9. Коэффициент усиления, полученный в результате моделирования данной антенны, по углу места  $90^\circ$  составляет 13,4 дБи.

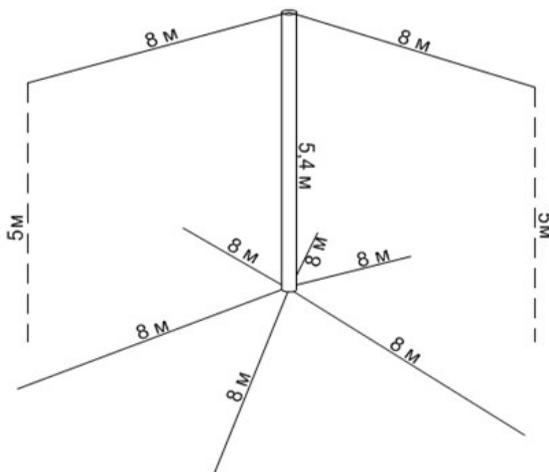


Рис. 8. Внешний вид исследуемой антенны

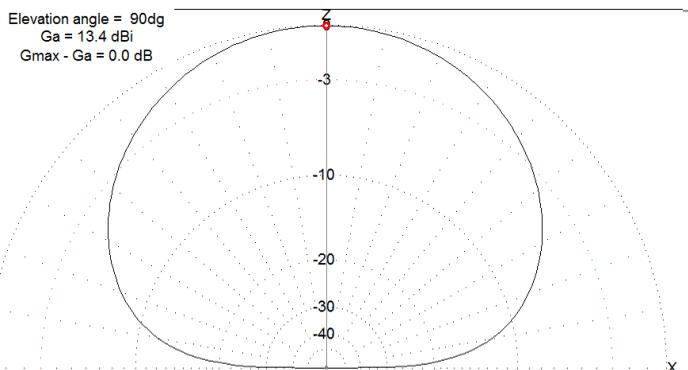


Рис. 9. Диаграмма направленности в вертикальной плоскости исследуемой антенны

Из результатов моделирования видно, что добавление противовесов к антенне, концы излучающих элементов которой подняты над поверхностью земли, не оказывает такого сильного эффекта, как в случае с классической «Inverted-V» антенной, но все же значительный положительный эффект присутствует. Для практической проверки результатов моделирования снова проведены реальные измерения уровней сигналов, результаты измерений занесены в табл. 4.

Таблица 4. Полученные результаты измерений

| Частота работы, МГц | Измеренный уровень полезного сигнала (среднее значение), дБм | Измеренный уровень эфирного шума (среднее значение), дБм | Соотношение сигнал/шум, дБ |
|---------------------|--|--|----------------------------|
| 4,825               | минус 89,7   | минус 114,3  | 24,6                       |
| 4,725               | минус 88,5   | минус 108  | 19,5                       |
| 4,531               | минус 83,0   | минус 110,1  | 27,1                       |

Из полученных в результате измерений данных можно сделать вывод, что реальные показатели уровней сигнала при данном варианте развертывания антенны практически не отличаются от двух предыдущих вариантов, и значения полученных данных значительно лучше, чем при использовании антенны в классическом варианте.

## Выводы

В данной статье проведено исследование влияния различных вариантов развертывания антенн на качество КВ-радиосвязи в ближней зоне. Проведено моделирование, выполнены практические измерения уровней сигналов. Исследование показало, что для ведения аналоговой телефонной/телеграфной связи в КВ-диапазоне в ближней зоне достаточно применять классическую «Inverted-V» антенну. Но как показала практика, проведение сеансов в цифровых режимах и режимах передачи данных при использовании данной антенны невозможно.

Для повышения эффективности радиосвязи были исследованы и предложены три варианта развертывания антенны: 1) установка противовесов под излучающим полотном антенны, 2) поднятие концов излучающих полотен над поверхностью земли, 3) поднятие концов излучающих элементов над поверхностью земли с дополнительной установкой противовесов под излучающее полотно. Все три предложенных варианта увеличивают соотношение сигнал/шум на приемной стороне в среднем на значения от 6 до 12 дБ по сравнению с классическим вариантом развертывания, что оказывает положительное влияние на ведение радиообмена. На практике выбор соответствующего варианта развертывания антенны будет зависеть от удобства его реализации.

## Список литературы

1. *Ротхаммель, К.* Антенны. М. : Энергия, 2014. 272 с.
2. *Гончаренко, И. В.* Антенны КВ и УКВ. Ч. 1. Компьютерное моделирование MMANA : монография. М. РадиоСофт, Радио, 2017. 128 с.
2. Антенны и фидеры. Передача информации по каналам связи. Контроль и измерения в технике связи / ред. С. В. Бородич. М. : НИИР, 2017. 100 с.
4. *Григорьев И. Н.* Все об антеннах. М. : Пресс, 2009. 352 с.
5. Методика расчета радиолиний между двумя антеннами / К. В. Шишаков, М. А. Бояршинов, П. В. Караваев, А. С. Батулин, А. В. Савельев // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3. С. 64–67.
6. *Верба, Б. П.* Способы построения согласующих антенных устройств / Б. П. Верба, Д. Г. Мосунов, К. В. Шишаков // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Международ. науч.-техн. конф. Ижевск, 2017. С. 43–50.
7. *Дулькейт, И. В.* Имитационная модель канала связи декаметрового диапазона радиоволн / И. В. Дулькейт, В. Л. Хазан // Техника радиосвязи. 2003. Вып. 8. С. 1829.
8. *Березовский, В. А.* Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / В. А. Березовский, И. В. Дулькейт, О. К. Савицкий / под ред. В. А. Березовского. М. : Радиотехника, 2011. 444 с.

9. E. Johnson, T. Kenney, M. Chamberlain, W. Furman, E. Koski, E. Leiby, M. Wadsworth. U.S. MIL-STD-188-141B Appendix C - A Unified 3rd Generation HF Messaging Protocol. Harris Corporation, RF Communications Division, 1998.

10. Eric E. Johnson. Third-Generation HF Automation in MIL-STD-188-141B. 1998.

B. P. Verba, postgraduate student

E-mail: i412767438@yandex.ru

K. V. Shishakov, CSc in phys. and math., associate professor

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Experimental Study of the Effect of V-Antenna Deployment Options on the Radio Communication Efficiency in the Near Zone at Frequencies Near 4.7 MHz**

*The article deals with the problem of conducting HF radio in the near zone. Offered variant deployment of antennas to improve the efficiency of the radio channel in the HF range. Computer simulations of antennas were performed, taking into account the deployment variations, to obtain electrical parameters, in particular, the gain. The article also reflects the results of real measurements of the signal levels when using different types of antennas.*

**Keywords:** HF-band, near zone, antenna, V-antenna, communication, efficiency increase.

УДК 621.382

*В. Г. Гравшин*, аспирант  
*С. В. Стойчев*, аспирант  
*П. А. Ушаков*, д-р техн. наук, проф.  
E-mail: grawowchik@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Реализация результатов синтеза ЭФИ на основе RC-ЭРП со структурой слоев R-C-0**

*В работе представлены результаты синтеза цепи, реализующей фрактальный импеданс на основе комбинации однородных RC-линий. Проведена оценка возможности физической реализации такой цепи в виде интегрального элемента, выполненного по толстопленочной технологии. Показано, что теоретические результаты синтеза не могут быть физически реализованы. Для решения задачи синтеза фрактального импеданса с возможностью его физической реализации в виде интегрального элемента предлагается использовать более широкую базу базовых импедансов, формируемых различными вариантами включения R-C-NR-линий.*

**Ключевые слова:** синтез, резистивно-емкостный элемент, распределённые параметры, R-C-0 структура, RCNR структура.

#### **Введение**

В настоящее время все больший интерес проявляется к использованию исчисления дробного порядка при проектировании систем управления, моделировании природных и технических систем, обработке сигналов [1].

Практическая реализация дробных операторов интегрирования и дифференцирования требует наличия элементов, импеданс которых имеет дробную (фрактальную) зависимость от частоты и которые будем называть элементами с фрактальным импедансом (ЭФИ).

Долгое время ЭФИ реализовывались на основе аппроксимации дробного оператора  $p^\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) дробно-рациональными функциями комплексной частоты  $p$  с последующим представлением этой функции в виде многозвенных электрических цепей Фостера и Кауэра на обычных R-, L- и C-элементах [2]. Недостатком такого подхода является то, что ЭФИ представляет собой сборку из элементов с очень широким разбросом номинальных значений с фиксированным значением показателя  $\alpha$ .

Известен метод синтеза входных импедансов с помощью комбинации длинных  $RC$ -линий [3]. В настоящее время отрезки  $RC$ -линий можно выполнить в виде пленочных или полупроводниковых многослойных структур вида резистор-диэлектрик-проводник ( $R-C-0$ ), которые получили название «резистивно-емкостные элементы с распределенными параметрами» или сокращенно  $RC$ -ЭРП. Поэтому замена элементов с сосредоточенными параметрами на элементы с распределенными параметрами представляется предпочтительной. Однако вопрос о возможности физической реализации  $RC$ -линий с параметрами, определенными с помощью предложенных подходов, в виде однородных  $RC$ -ЭРП со структурой слоев вида  $R-C-0$  до настоящего времени не исследован.

Целью данной работы является проверка возможности физической реализации ЭФИ, синтезированного на основании методики, предложенной в [3], в виде интегрального элемента, выполненного по одной из пленочных технологий, и определение перспектив этого метода синтеза для создания физически реализуемых ЭФИ.

### Решение задачи

В работе [4], используя теорию и методику синтеза, рассмотренную в [3], путем оптимизации коэффициентов дробно-рациональной функции входного импеданса был синтезирован фрактальный импеданс на основе комбинации четырех  $RC$ -линий. При этом получено выражение для оптимизированной функции импеданса в плоскости  $t$ , которое имеет следующий вид:

$$\sqrt{pZ}_{вх} = \frac{12,237t^4 + 1,469t^2 + 0,003724}{2,948t^3 + 0,212t}, \quad (1)$$

где  $t = th\sqrt{pRC}$ ,  $p = \sigma + j\omega$  – комплексная частота,  $R$  и  $C$  – полные сопротивления  $RC$ -линий.

Для синтеза цепи на основе выражения (1) можно использовать два классических способа определения параметров двухполюсной цепи: разложение функции импеданса в непрерывную дробь и представление функции (1) в виде суммы простых дробей [5].

Представление в виде непрерывной дроби дает

$$\sqrt{pZ}_{вх} = 4,151t + \frac{1}{5t + \frac{1}{3t + \frac{1}{51,92t}}}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что цепь представляет из себя двухзвенную лестничную цепь, в которой параметры линий, формирующих звенья, определяются как  $Z_1 = 4,151$ ,  $Y_2 = 5$ ,  $Z_3 = 3$ ,  $Y_4 = 51,92$ . Поскольку  $Z_i = 1/Y_i = \sqrt{R_i/C_i}$ , получаем  $Z_2 = 1/5$ ,  $Z_4 = 1/51,92$ . Схема, реализующая входной импеданс (2), была представлена в работе [4].

Представление функции (1) в виде суммы простых дробей дает

$$\sqrt{p}Z_{6x} = 4,151t + \frac{0,01756}{t} + \frac{0,53724t}{2,948t^2 + 0,212}. \quad (3)$$

Получается, что первый член соответствует короткозамкнутой  $RC$ -линии при  $Z_1 = \sqrt{R/C} = 4,151$ , второй член – разомкнутой  $RC$ -линии при  $Z_2 = \sqrt{R/C} = 0,01756$ , а третий член представляет из себя входной импеданс двух последовательно включенных  $RC$ -линий и определяется выражением [3]:

$$\sqrt{s}Z_{6x} = \frac{(Z_3 + Z_4) \cdot t}{1 + Z_4 Y_3 t^2}. \quad (4)$$

Из сравнения с третьим членом формулы (3) получаем

$$\frac{Z_3 + Z_4}{Z_4 Y_3} = 0,1822, \quad (5)$$

$$\frac{1}{Z_4 Y_3} = 0,072 \quad (6)$$

или

$$Z_3 + Z_4 = 2,53, \quad (7)$$

$$\frac{Z_3}{Z_4} = 0,072. \quad (8)$$

Таким образом,  $Z_3 = 0,17$ ,  $Z_4 = 2,36$ .

Схема, реализующая входной импеданс в данном случае, изображена на рис. 1.

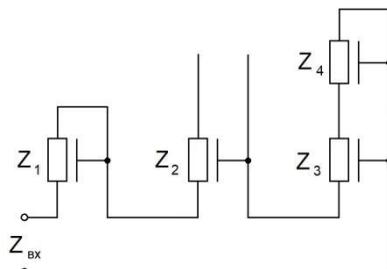


Рис. 1. Реализация входного импеданса (1) при его разложении по полюсам

### Обсуждение результатов

Как уже указывалось, конструктивно  $RC$ -линию можно выполнить в виде последовательно нанесенных друг на друга полосок прямоугольной формы из резистивного, диэлектрического и проводящего материалов ( $RC$ -ЭРП). Геометрические размеры  $RC$ -ЭРП определяются параметрами линии, заданными в процессе синтеза, и удельными параметрами наносимых слоев.

Рассмотрим возможность реализации результатов синтеза в виде комбинации  $RC$ -ЭРП, выполненных по толсто пленочной технологии. Для этого рассчитаем геометрические размеры резистивного и диэлектрического слоев на основе найденных нами параметров из выражения (3) для первой  $RC$ -линии, импеданс которой  $Z_1 = \sqrt{R/C} = 4,151$ . Пусть материал диэлектрика будет иметь удельную емкость  $C_0 = 50$  пФ/мм<sup>2</sup>. Если принять, что с помощью выбранной технологии можно изготовить конденсатор с емкостью  $C = 1$  нФ, то для этого потребуется площадь  $20$  мм<sup>2</sup>. Но чтобы получить  $Z_1 = 4,151$ , сопротивление резистора  $R$  на этой же площади должно быть равно  $17,23$  нОм.

Теперь, исходя из найденной площади и при минимальном значении контролируемого сопротивления квадрата материала резистивной пленки  $1$  Ом, определим величину сопротивления, которое можно реализовать на данной площади. При минимально допустимом размере толсто пленочного элемента  $0,1$  мм (допустим, это будет длина полоски) второй размер полоски должен быть  $200$  мм. При этом сопротивление резистивного слоя  $RC$ -ЭРП составит  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Ом, что почти на пять порядков больше требуемого.

Таким образом, несмотря на то, что теоретически можно синтезировать двухполюсник на основе комбинации  $RC$ -линий, имеющий фрактальный импеданс, но его физическая реализация в виде комбинации

пленочных (полупроводниковых) *RC*-ЭПП со структурой слоев вида *R-C-0* оказывается невозможной.

В настоящее время известны более сложные виды структур слоев *RC*-ЭПП, моделью которых является *R-C-NR*-линия. Этот четырех-полосник характеризуется матрицей *z*-параметров вида [6]

$$\frac{R}{\theta} \begin{bmatrix} \frac{N+1}{\tanh\theta} & -N \tanh\frac{\theta}{2} & -\frac{N+1}{\sinh\theta} & -\tanh\frac{\theta}{2} \\ -N \tanh\frac{\theta}{2} & \frac{N}{N+1} \left( \theta + 2N \tanh\frac{\theta}{2} \right) & -N \tanh\frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1} \left( \theta - 2 \tanh\frac{\theta}{2} \right) \\ -\frac{N+1}{\sinh\theta} & -N \tanh\frac{\theta}{2} & \frac{N+1}{\tanh\theta} & -\tanh\frac{\theta}{2} \\ -\tanh\frac{\theta}{2} & -\frac{N}{N+1} \left( \theta - 2 \tanh\frac{\theta}{2} \right) & -\tanh\frac{\theta}{2} & \frac{1}{N+1} \left( N\theta - 2 \tanh\frac{\theta}{2} \right) \end{bmatrix},$$

где  $\theta = \sqrt{p(1+N)RC}$  – постоянная распространения *R-C-NR*-линии; *N* – коэффициент, отображающий, во сколько раз отличаются друг от друга верхний и нижний резистивные слои в *R-C-NR*-структуре.

На основе этой матрицы можно создать базу из 34 двух-, трех- и четырехполосных включений, которые имеют достаточно широкий набор различных входных импедансов.

Для примера на рис. 2 приведены некоторые из возможных вариантов двух и четырехполосных включений *R-C-NR*-линий.

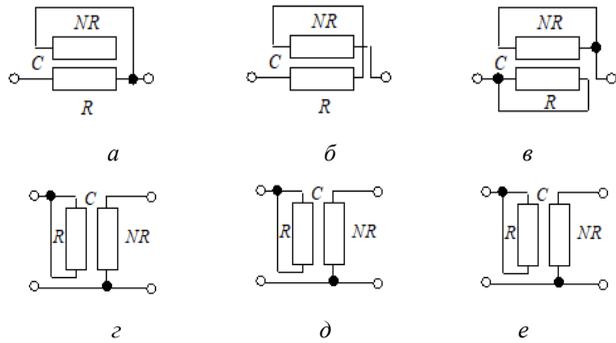


Рис. 2. Некоторые варианты включений *RC*-ЭПП со структурой слоев *R-C-NR*: *a, б, в* – двухполосные схемы включения, *г* – четырехполосная схема включения с емкостной связью, *д* – четырехполосная схема включения с гальванической связью, *е* – схема включения в виде проходного четырехполосника

Наличие такой базы позволит использовать для синтеза и другие способы представления дробно-рациональной функции импеданса, которые на наш взгляд позволят создавать  $RC$ -ЭРП и ЭФИ на их основе, реализуемые в виде интегральных элементов микросхем.

## Выводы

Применение методики синтеза импедансов на основе комбинации однородных  $RC$ -линий, предложенной в работе [3], приводит к схемам, параметры линий в которых не позволяют реализовать эти схемы в виде интегральных элементов, изготовленных с помощью пленочных или полупроводниковых технологий.

Дальнейшее развитие методов синтеза импедансов (в том числе фрактальных) видится в расширении базы базовых импедансов, на основе которых производится синтез, например, за счет использования различных вариантов включений  $R$ - $C$ - $NR$ -линий.

*Работа выполнена при поддержке гранта ИжГТУ №11.04.03/18УПА на тему «Разработка и исследование новых электронных компонентов для аналоговых процессоров, позволяющих моделировать динамические процессы, описываемые дифференциальными уравнениями дробного порядка».*

## Список литературы

1. Azar A. T., Radwan A. G., Vaidyanathan S. (eds.). Fractional Order Systems: Optimization, Control, Circuit Realizations and Applications. Elsevier, Amsterdam, 2018. 741 p.
2. Tsirimokou, G. A systematic procedure for deriving RC networks of fractional-order elements emulators using MATLAB. AEU - International Journal of Electronics and Communications. Vol. 78, pp. 7-14, 2017. DOI: 10.1016/j.aeu.2017.05.003.
3. Скэнлен, Д. Основы анализа и синтеза распределенных цепей // Введение в микроэлектронику / под ред. И. П. Степаненко. М. : Сов. радио, 1968. 320 с.
4. Стойчев, С. В. Параметрический синтез элементов с фрактальным импедансом на основе однородных  $RC$ -линий / С. В. Стойчев, В. Г. Гравшин, П. А. Ушаков // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбов : Тамбов. гос. техн. ун-т, 2019 г. (принята к печати)
5. Petraš I., Podlubny I., O'Leary P. et al. Analogue Realization of Fractional Order Controllers. Košice: Fakulta BERG TU Košice, pp. 281-296, 2002.
6. Гильмутдинов, А. Х. Фрактальные элементы : учеб. пособие / А. Х. Гильмутдинов, П. А. Ушаков ; под ред. А. Х. Гильмутдинова. Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013. 308 с.

V. G. Gravshin, postgraduate student

S. V. Stoichev, postgraduate student

P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor

E-mail: grawowchik@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Realization of the Results of the Synthesis of EFI Based on Distributed RC-Network with the Structure of Layers R-C-0**

*This paper presents the results of the synthesis of circuit that realized fractal impedance based on combinations of uniform RC-lines. An assessment was made of the possibilities of implementing such circuits in the form of an integral element made using thick-film technology. It is shown that the theoretical results of the synthesis cannot be physically realized. To solve the problem of fractal impedance synthesis, it is necessary to use a wider base of base impedances, which form various options in interconnections of R-C-NR-lines.*

**Keywords:** synthesis, RC-network, distributed parameters, R-C-0 structure, RCNR structure.

---

УДК 62-521

Ж. А. Даев, д-р философии, канд. техн. наук, доц.

E-mail: zhand@yandex.ru

Баишев университет, г. Актобе, Казахстан

Н. З. Султанов, д-р техн. наук, проф.

E-mail: sultanov@mail.osu.ru

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

### **Автоматическая система одоризации природного газа, основанная на методах нечеткой логики**

*В работе обсуждается проблема одоризации природного газа. Моделирование системы одоризации с учетом всех требований нормативов приводит к сложным моделям процесса одоризации газа, что усложняет реализацию таких систем. Поэтому в рамках настоящей работы предлагается модель одоризационной установки, которая основана на методах нечеткой логики. В работе приводится формализация метода одоризации с помощью нечетких множеств путем введения лингвистических переменных, формирование нечеткой базы правил по алгоритму модели Мамдани, анализируется работа такой нечеткой системы.*

**Ключевые слова:** одоризация, природный газ, нечеткая логика, автоматизация.

#### **Введение**

Трубопроводный транспорт природного газа является одним из важнейших и практически единственным способом доставки больших объемов данного энергоносителя конечным потребителям. Практически весь добываемый природный и нефтяной попутный газ транспортируется по магистральным газопроводам [1]. Во время организации трубопроводного транспорта природного газа по магистральным газопроводам доставка энергоносителя до конечного потребителя состоит из серии технологических процессов, таких как осушка газа, удаление механических примесей, нагнетание, редуцирование, измерение количества газа, одоризация и т. д.

В данной статье речь пойдет о процессе одоризации природного газа. Природный газ, очищенный от серосодержащих соединений, механической примеси и воды, не имеет никакого цвета и запаха, поэтому обнаружить его утечку является довольно трудной задачей [1]. Для того чтобы придать природному газу резкий и неприятный запах, его одори-

руют, т. е. процесс придания запаха природному газу называется одоризацией. Во время одоризации в природный газ вводят специальные вещества, которые называются одорантами. В частности одорант изготавливают из смеси, которая состоит из метилмеркаптана, этилмеркаптана, пропилмеркаптана [5]. Например, в работе [5] упоминается одорант марки СПМ, представляющий собой смесь, которая состоит из 30 % этилмеркаптана, 50–60 % изо- и н-пропилмеркаптанов, 10–20 % изобутилмеркаптанов.

Устройства, которые выполняют одоризацию, называются одоризационными установками. В зависимости от расхода установки добавляют определенное количество одоранта. Различные конструкции таких установок описаны в работах [1– 5]. Первые одоризационные установки капельного типа имеют постоянный расход одоранта, который выполняет добавление одоранта с постоянной скоростью, более совершенные установки, разработанные позже, выполняют дозирование одоранта в зависимости от расхода. Тем не менее, авторы считают, что существующие одоризационные установки не могут учесть всех факторов, которые влияют на безопасное использование газового топлива и эффективную эксплуатацию одоризационных установок. А моделирование всей работы одоризационной установки традиционными математическими моделями делают эту работу перегруженной и сложной для формализации. Поэтому в рамках настоящей работы предлагается модель автоматической одоризационной установки, в основу которой положены методы нечеткой логики.

### **Формализация задачи на нечетких множествах**

Степень одоризации природного газа оценивают в соответствии с нормативным документом [6]. В данном документе рассматривается два способа оценки степени одоризации: камерный и приборный. Сущность обоих методов заключается в оценке интенсивности запаха газовоздушной смеси, создаваемой в камере или приборе по следующей пяти-балльной шкале [6]:

- 0 – запаха нет;
- 1 – запах очень слабый, неопределенный;
- 2 – запах слабый, но определенный;
- 3 – запах умеренный;
- 4 – запах сильный;
- 5 – запах очень сильный.

Как видно из последней шкалы, термины нечетких множеств, связанные с интенсивностью запаха, уже присутствуют в неявном виде. Пред-

ставленную в документе [6] шкалу можно описать в виде лингвистической переменной  $x$  «интенсивность запаха газа».

В соответствии с работой [5] рекомендуемая норма среднегодовой концентрации одоранта, которая представляет собой смесь меркаптанов для  $1000 \text{ м}^3$ , должна быть следующая:

- минимальная норма 5 г;
- максимальная норма 16 г.

Свяжем данные требования по концентрации с лингвистической переменной «интенсивность запаха газа». Для этого определим границы нечетких множеств, которые определяют термы лингвистической переменной следующим образом:  $A_1 = \{x, \mu_{A_1}(x)\}$  – запаха нет,  $A_2 = \{x, \mu_{A_2}(x)\}$  – запах очень слабый, неопределенный,  $A_3 = \{x, \mu_{A_3}(x)\}$  – запах слабый, но определенный,  $A_4 = \{x, \mu_{A_4}(x)\}$  – запах умеренный,  $A_5 = \{x, \mu_{A_5}(x)\}$  – запах сильный,  $A_6 = \{x, \mu_{A_6}(x)\}$  – запах очень сильный, где  $x$  – массовая концентрация одоранта на  $1000 \text{ м}^3$ ,  $\mu(x)$  – функция принадлежности нечетких множеств. Такая лингвистическая переменная со своими термами будет представлена на рис. 1.

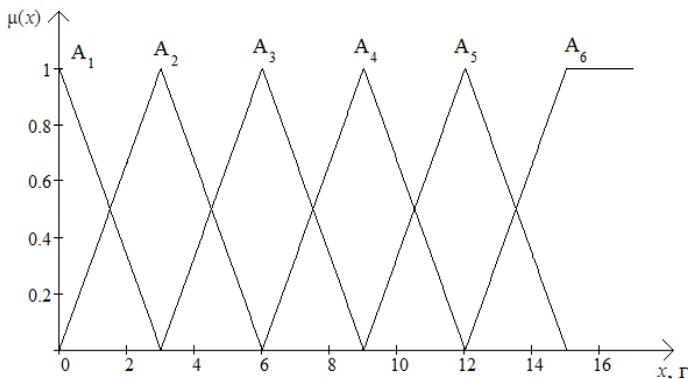


Рис. 1. Преобразованная лингвистическая переменная «Интенсивность запаха газа»

С учетом введенной лингвистической переменной нечеткий регулятор может контролировать величину дозирования, чтобы интенсивность запаха газа оставалась не только достаточной, но и безопасной. С другой стороны, в работах [1, 5] говорится о том, что величина концентрации, указанная на рис. 1, является среднегодовой, а в летнее время года

норма одоранта должна снижаться в два раза. Также величина расхода одоранта должна зависеть от количества транспортируемого газа. Последнее обусловлено тем, что на каждом населенном пункте потребление газа сильно отличается. Поэтому для расхода газа, отпускаемого в населенный пункт, можно ввести лингвистическую переменную  $y$  «потребляемый расход газа». Нечеткие множества для такой лингвистической переменной можно выполнить в соответствии с рекомендациями нормативного документа [8]. В данном документе замерные узлы расхода и количества газа делятся в зависимости от величины измеряемого объемного расхода газа на следующие категории:

- свыше 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч – большой производительности;
- от 20 тыс. до 100 тыс. м<sup>3</sup>/ч – средней производительности;
- от 1 тыс. до 20 тыс. м<sup>3</sup>/ч – малой производительности;
- до 1 тыс. м<sup>3</sup>/ч – минимальной производительности.

Если использовать данные категории в качестве термов введенной лингвистической переменной, то ее можно представить следующим образом:  $B_1 = \{y, \mu_{B_1}(y)\}$  – минимальный расход газа;  $B_2 = \{y, \mu_{B_2}(y)\}$  – малый расход газа;  $B_3 = \{y, \mu_{B_3}(y)\}$  – средний расход газа;  $B_4 = \{y, \mu_{B_4}(y)\}$  – большой расход газа. Лингвистическую переменную  $s$  с термами можно изобразить через трапециевидальные нечеткие множества, как на рис. 2.

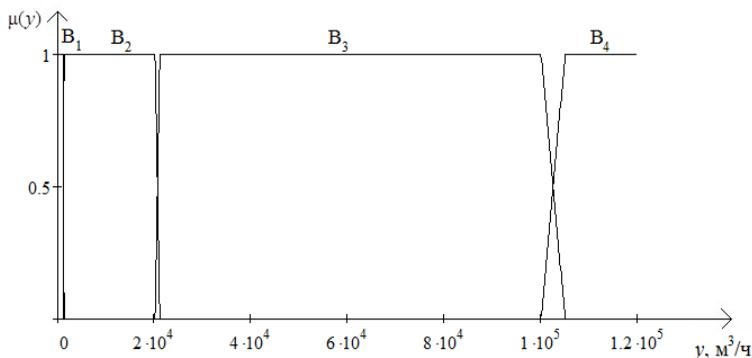


Рис. 2. Лингвистическая переменная «потребляемый расход газа»

Из нормативных документов также требуется дозировать расход газа в зависимости от времени года, потому что количество газа и норма потребления газа сильно зависит от времени года. Для учета времени

года введем в рассмотрение еще одну лингвистическую переменную  $t$  «время года». Введем термы, связанные с временем года с соответствующими нечеткими множествами:  $C_1 = \{t, \mu_{C_1}(t)\}$  – зимнее время года;  $C_2 = \{t, \mu_{C_2}(t)\}$  – весенне-летнее время года;  $C_3 = \{t, \mu_{C_3}(t)\}$  – осеннее время года.

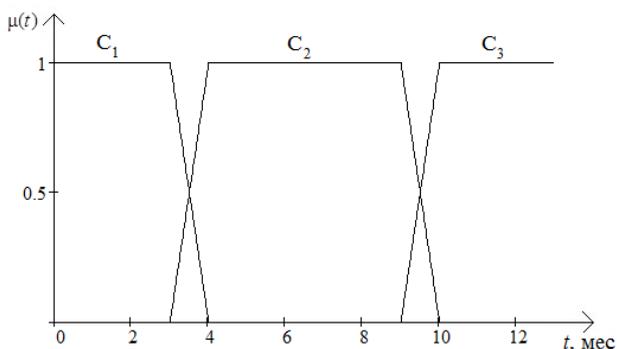


Рис. 3. Лингвистическая переменная «Время года»

Данная переменная будет отражать времена года. Отсчет по шкале абсцисс начнем с декабря, который будет характеризоваться интервалом от нуля до единицы, и так далее до одиннадцатого месяца. Графическое представление данной переменной отображается трапециевидальными нечеткими множествами, которые представлены на рис. 3.

В соответствии с работами [7, 9] концепция лингвистической нечеткой модели управления динамическими системами была предложена Мамдани. В нашем случае система регулирования количества одоранта должна выполнять дозирование в зависимости от потребляемого расхода и времени года. Введение нечетких множеств позволит также варьировать величину одоризации с учетом времени года так, чтобы интенсивность запаха газа была довольно ощутимой и менее вредной для потребителя. Этот процесс можно смоделировать, а затем реализовать в нечетком регуляторе путем введения нечеткой базы правил, которую составим ниже:

R1: (ЕСЛИ  $(y = B_1)$  И  $(t = C_1)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_1)$  И  $(t = C_3)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_2)$  И  $(t = C_3)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_3)$  И  $(t = C_3)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_4)$  И  $(t = C_3)$ ) ТО  $(x = A_5)$ ,

R2: (ЕСЛИ  $(y = B_1)$  И  $(t = C_2)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_2)$  И  $(t = C_2)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_3)$  И  $(t = C_2)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_4)$  И  $(t = C_2)$ ) ТО  $(x = A_4)$ ,

R3: (ЕСЛИ  $(y = B_2) \frac{n!}{r!(n-r)!}$  И  $(t = C_1)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_3)$  И  $(t = C_1)$ ) ИЛИ (ЕСЛИ  $(y = B_4)$  И  $(t = C_1)$ ) ТО  $(x = A_6)$ .

Таким образом, довольно ответственный и сложный процесс можно смоделировать с помощью нечеткой системы, работа которой описывается нечеткой базой правил. Применяемые операторы И/ИЛИ выполняют с помощью  $s$ -норм и  $t$ -норм, которые подробно описываются в работах [7, 10]. Операторы  $s$ -норм и  $t$ -норм могут быть организованы в контроллерах, которые поддерживают стандарт МЭК 61131-7, либо такие операторы могут быть реализованы путем написания программ на языках стандарта МЭК 61131-3. На примере данной модели показана формализация решения задачи автоматизации процесса одоризации природного газа.

### Результаты и их обсуждение

Результаты работы нечеткой одоризационной системы природного газа можно увидеть через трехмерную поверхность, которая формируется на выходе системы в зависимости от комбинации входных лингвистических переменных. Такая трехмерная поверхность представлена на рис. 4.

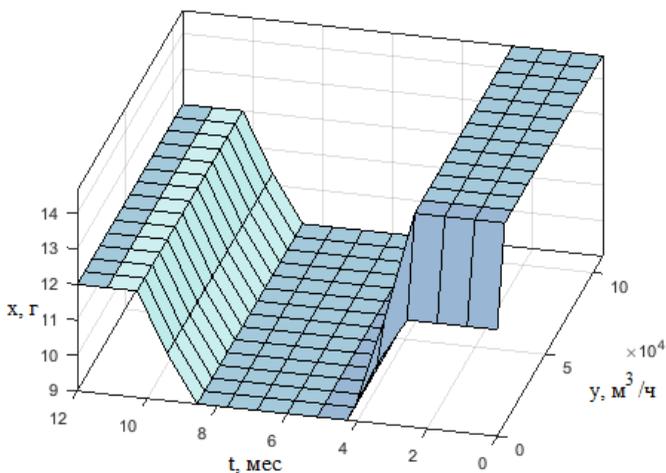


Рис. 4. Выходная переменная системы в виде поверхности

Путем введения группы лингвистических переменных и соответствующих нечетких множеств легко, без привлечения сложных математических моделей можно реализовать вполне адекватную систему, которая позволяет выполнять одоризацию газа перед тем, как отправлять его конечному потребителю.

### Выводы

Таким образом, в рамках настоящей статьи рассмотрено решение задачи об автоматизации процесса одоризации природного газа с помощью нечетких множеств. Показана модель автоматической системы одоризации, которая выполняет дозирование одоранта в зависимости от потребляемого количества газа и учитывает время года, благодаря чему снижается расход одоранта и повышается безопасность эксплуатации газового топлива.

### Список литературы

1. Алиев, Р. А. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р. А. Алиев, В.Д. Белоусов, А. Г. Немудров. М. : Недра, 1988. 368 с.
2. Темников, А. А. Одоризация углеводородного топлива. Одоризационные установки // Science Time. 2016. №4 (28). С. 834–837.
3. Кузь, Н. В. Измерительная система объема природного газа и степени его одоризации / Н. В. Кузь, М. О. Шевчук // Мир измерений. 2014. № 5. С. 11–12.
4. Negaresh, M. Modeling and control of natural gas bypass odorizer / M. Negaresh, M. Farrokhnia, N. Mehranbod // Journal of Natural Gas Science and Engineering (2018). DOI: 10.1016/j.jngse.2017.12.010.
5. Данилов, А. А. Автоматизированные газораспределительные станции : справочник. СПб. : Химиздат, 2004. 544 с.
6. ГОСТ 22387.5–77. Газ для коммунально-бытового потребления. Методы определения интенсивности запаха. М. : Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
7. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
8. МИ 3082–2007. Выбор методов и средств измерений расхода и количества потребляемого природного газа в зависимости от условий эксплуатации на узлах учета. Рекомендации по выбору рабочих эталонов для их поверки. Казань : ФГУП «ВНИИР», 2007. 42 с.
9. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant // Proc. IEEE. 1974. No. 12 (121). Pp. 1585-1588.
10. Ярушкина, Н. Г. Основы нечетких и гибридных систем М. : Финансы и статистика, 2009. 320 с.

Zh. A. Dayev, Ph.D., CSc in engineering, associate professor

E-mail: zhand@yandex.ru

Baishev University, Aktobe, Kazakhstan

N. Z. Sultanov, DSc in engineering, full professor

E-mail: sultanov@mail.osu.ru

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

### **Automatic Natural Gas Odorization System Based on Fuzzy Logic Methods**

*The paper discusses the problem of odorization of natural gas. Modeling of the odorization system taking into account all the requirements of standards leads to complex models of the gas odorization process, which complicates the implementation of such systems. Therefore, in this paper we propose a model of odorization plant, which is based on fuzzy methods. The paper presents the formalization of the odorization method using fuzzy sets by introducing linguistic variables, the formation of a fuzzy rule base on the algorithm of the Mamdani model, analyzes the work of such a fuzzy system.*

**Keywords:** odorization, natural gas, fuzzy logic, automation.

---

УДК 629.13

*А. А. Закиров*, аспирант

E-mail: zexeso@gmail.com

*И. П. Казаков*, магистрант

E-mail: vanyakazakov@mail.ru

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Статическая калибровка блока из трех ортогонально расположенных акселерометров**

*Статья посвящена статической калибровке конструктивно выполненных блоков из трех ортогонально расположенных акселерометров для повышения точности определения проекций силы тяжести на координаты связанной с объектами пространственно-ортогональной системы координат. Отлажен производственный стенд калибровки с программно-алгоритмическим обеспечением, поддерживающим две методики калибровки: линейную и нелинейную. Для конкретных акселерометров выполнена калибровка по этим двум методикам и проведено сравнение полученных результатов. Показано, что для выбранных прецизионных акселерометров вполне достаточно использовать линейную методику калибровки.*

**Ключевые слова:** акселерометр, калибровка, стенд, программно-алгоритмическое обеспечение, методика.

#### **Введение**

Конструктивно выполненные блоки из трех ортогонально установленных акселерометров находят широкое применение в системах угловой ориентации и пространственной ориентации широкого класса подвижных объектов. В том числе они являются неотъемлемой частью современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и инклинометров [1, 2].

Представляя собой автономные модули, комплексированные с гироскопами в соответствующие навигационные системы, они имеют режимы, программно-алгоритмически ориентированные на проведение статических и динамических измерений [3, 4]. Статические режимы традиционно предназначены для проведения измерений проекций силы тяжести на оси координат на остановках (в состоянии покоя объектов). К ним относятся режимы начальной угловой выставки БИНС и режимы

инклинометров с периодическими измерениями на остановках прибора в скважине. Динамические режимы, в свою очередь, предназначены для проведения измерений проекций ускорений объектов в процессе их движения.

Калибровка таких блоков акселерометров обычно проводится в режиме статических измерений.

Целью статьи является описание и исследование эффективности созданного производственного стенда с программно-алгоритмическим обеспечением для статической калибровки конструктивно выполненных блоков из трех ортогонально расположенных акселерометров для повышения точности определения проекций силы тяжести на координаты связанной с объектами ортогональной системы координат.

### **Общая характеристика стенда для калибровки блока из трех акселерометров**

Калибруемый модуль представляет собой конструкцию типа куба, вдоль ребер которого ортогонально установлены три акселерометра. Если принять эти три ребра куба за три ортогональные оси координат, то показания акселерометров в статическом режиме будут показывать три проекции вектора силы тяжести. При этом положение вектора в пространстве характеризуется двумя углами, за которые выбраны углы крена и тангажа.

Калибровка блока акселерометров предназначалась для БИНС наземных движущихся объектов [4]. Поэтому калибровочные измерения проводились в диапазонах изменения углов рысканья, крена и тангажа от  $-30$  до  $30$  угл. градусов с шагом  $15$  угл. градусов.

Основной причиной проведения калибровки является уточнение масштабных коэффициентов и измерительных функций (характеристик) сигналов акселерометров, а также компенсация нарушения идеальной ортогональности конструктивной установки акселерометров в блоке. При этом выбор методики калибровки зависит от технических характеристик акселерометров [5].

Процедурно калибровка трех акселерометров в блоке проводится последовательно. По очереди калибруются показания каждого из акселерометров с учетом влияния на них других двух акселерометров [6, с. 180]. Поэтому в дальнейшем будем говорить про калибровку выбранного акселерометра с учетом влияния двух других.

Если измерительные характеристики акселерометров (зависимости выходных сигналов от измеряемых ускорений) высоко линейны, то калибровочная модель принимается линейной с минимальным числом

калибровочных коэффициентов (т. к. вклад нелинейных составляющих получается несущественным).

В свою очередь, для нелинейных характеристик акселерометров обычно используют квадратично нелинейную модель с расширенным числом калибровочных коэффициентов [7].

### **Методическое обеспечение стенда: линейная и нелинейная методики калибровки акселерометров**

Для блоков из трех акселерометров, в зависимости от нелинейных свойств сигналов составных акселерометров [5], реализованы линейная и нелинейная методики калибровки. При этом основная процедура калибровки блока акселерометров проводится при заданной температуре.

На практике внутренние термодформации конструкции блока акселерометров и самих акселерометров часто нарушают калибровку, выполненную при одной температуре.

Чтобы выполнить калибровку в широком диапазоне температур, наиболее просто построить таблицу калибровочных коэффициентов, соответствующих выбранным значениям температур из диапазона. При этом температурные интервалы работоспособности составных калибровок определяются мерой изменчивости калибровочных коэффициентов.

В дальнейшем для определенности будем говорить о калибровке при заданной температуре.

### **Модель для линейной четырехкоэффициентной калибровки**

В этом случае калибровка акселерометра, измеряющего проекцию ускорения  $g_{X_1}$ , основана на нахождении калибровочных коэффициентов:

$$g_{X_1}^{u\partial} \approx K_0 + K_X g_{X_1} + K_Y g_{Y_1} + K_Z g_{Z_1}, \quad (1)$$

где  $g_{X_1}^{u\partial}$  – вычисленное через измеренные стендом углы идеальное значение проекции силы тяжести  $g$ ;  $(g_{X_1}, g_{Y_1}, g_{Z_1})$  – сигналы акселерометров, установленных вдоль осей  $X_1Y_1Z_1$  связанной с блоком акселерометров системы координат;  $K_0$  – коэффициент уточнения нуля акселерометра;  $K_X$  – масштабный коэффициент акселерометра;  $(K_Y, K_Z)$  – коэффициенты коррекции нарушения взаимной ортогональности блока акселерометров.

Для нахождения калибровочных коэффициентов:

1) Строится с помощью измерений при разных углах крена, тангажа и рысканья избыточная таблица из значений  $\{g_{X_1}^{u\delta}, g_{X_1}, g_{Y_1}, g_{Z_1}\}$ .

2) Для каждой ее строки находятся ошибки выполнения (1).

3) Выполняется минимизация этих ошибок по методу наименьших квадратов.

4) Решается система из четырех линейных алгебраических уравнений относительно калибровочных коэффициентов  $(K_0, K_X, K_Y, K_Z)$ . При этом получится:  $K_0 \rightarrow 0, K_X \rightarrow 1, K_Y \rightarrow 0, K_Z \rightarrow 0$ . Чтобы выровнять значения искомым коэффициентов, уравнения (1) могут быть переписаны в следующей форме:

$$(g_{X_1}^{u\delta} - g_{X_1}) \approx K_0 + \delta K_X g_{X_1} + K_Y g_{Y_1} + K_Z g_{Z_1}. \quad (2)$$

Здесь  $\delta K_X = K_X - 1 \rightarrow 0$ , а искомыми коэффициентами являются малые корректирующие величины  $(K_0, \delta K_X, K_Y, K_Z)$ . Заметим, что при использовании предварительной процедуры центрирования можно перейти к системе из трех алгебраических уравнений [6, с. 180].

### Модель для нелинейной десятикоэффициентной калибровки

Такая модель может потребоваться для калибровки акселерометров с нелинейной характеристикой, которую можно описать квадратичной функцией:  $g_{X_1}^{u\delta} \approx K_0 + K_X g_{X_1} + K_{XX} g_{X_1}^2$ . Тогда, с учетом показаний двух других акселерометров, получим десятикоэффициентную модель:

$$g_{X_1}^{u\delta} \approx K_0 + K_X g_{X_1} + K_Y g_{Y_1} + K_Z g_{Z_1} + K_{XX} g_{X_1}^2 + K_{YY} g_{Y_1}^2 + K_{ZZ} g_{Z_1}^2 + \dots \\ \dots + K_{XY} g_{X_1} g_{Y_1} + K_{XZ} g_{X_1} g_{Z_1} + K_{YZ} g_{Y_1} g_{Z_1}; \quad (3)$$

где все калибровочные коэффициенты  $K$  будут малы, кроме  $K_X \rightarrow 1$ .

Для нахождения калибровочных коэффициентов:

1) Строится с помощью измерений при разных углах крена, тангажа и рысканья избыточная таблица из значений  $\{g_{X_1}^{u\delta}, g_{X_1}, g_{Y_1}, g_{Z_1}\}$ .

2) Для каждой ее строки находятся ошибки выполнения (3).

3) Выполняется минимизация этих ошибок по методу наименьших квадратов.

4) Решается система из десяти нелинейных алгебраических уравнений относительно калибровочных коэффициентов ( $K_0$ ,  $K_X$ ,  $K_Y$ ,  $K_Z$ ,  $K_{XX}$ ,  $K_{YY}$ ,  $K_{ZZ}$ ,  $K_{XY}$ ,  $K_{XZ}$ ,  $K_{YZ}$ ).

### Результаты линейной и нелинейной калибровки варианта блока акселерометров серии АК-15

Полученные результаты калибровки показаны на рис. 1. Рассматривается один акселерометр из триады, на остальных акселерометрах разница между линейной и нелинейной калибровкой аналогична. Величина на оси ординат соответствует линейному ускорению акселерометра, измеряемому в  $mg$ . Величина на оси абсцисс соответствует времени, съем данных длился 1 час. На графиках присутствует естественный дрейф акселерометров за длительный промежуток времени.

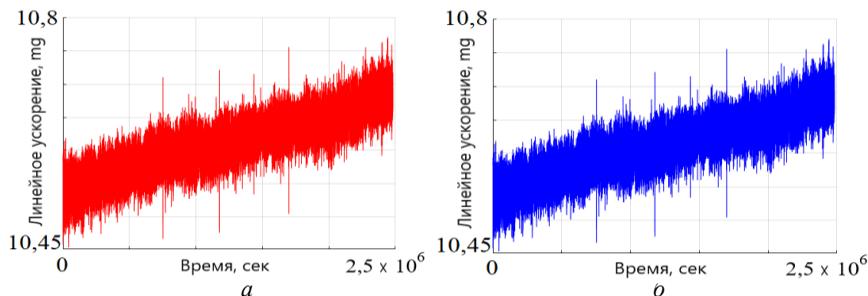


Рис. 1. Показания акселерометра АК-15: *a* – при линейной калибровке; *б* – при нелинейной калибровке

### Сравнение результатов линейной и нелинейной калибровок блока акселерометров серии АК-15

Сравнение скомпенсированных сигналов линейной и нелинейной калибровок показано на рис. 2. Изображен случайно выбранный промежуток измерения. Для акселерометров повышенной точности серии АК-15 использование методик линейной и нелинейной калибровок привело к примерно одинаковым результатам.

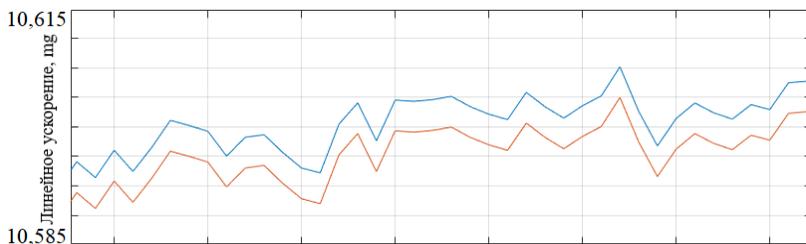


Рис. 2. Сравнение результатов линейной и нелинейной методик калибровки акселерометра АК-15

Откалиброванный таким образом блок акселерометров используется в составе БИНС. Одним из результатов работы БИНС является определение углов ориентации объекта, на котором он установлен. В качестве оценки работы алгоритмов калибровки рассматриваются отклонения углов ориентации от идеальных значений. При этом максимальная погрешность показания акселерометров по тангажу и крену после линейной калибровки составила  $\Delta_{\theta} = 0,00693^{\circ}$  и  $\Delta_{\gamma} = 0,00503^{\circ}$ , соответственно. После нелинейной калибровки  $\Delta_{\theta} = 0,00658^{\circ}$  и  $\Delta_{\gamma} = 0,00454^{\circ}$ , соответственно. Для выбранных прецизионных акселерометров вполне достаточно использовать линейную методику калибровки.

### Заключение

Таким образом, разработанный и отлаженный производственный стенд калибровки позволяет выполнять статическую калибровку конструктивно выполненных автономных блоков из трех ортогонально расположенных акселерометров, предназначенных для повышения точности определения проекций ускорений на координаты связанной с объектами пространственно-ортогональной системы координат. Он укомплектован программно-алгоритмическим обеспечением, предназначенным для калибровки как высокоточных акселерометров, так и среднеточных акселерометров с проявлением нелинейности их измерений. В качестве примера приведены результаты калибровки прецизионных акселерометров повышенной точности серии АК-15. Для них использование методик линейной и нелинейной калибровки привело к примерно одинаковым результатам, что показало достаточность более простой линейной калибровки для данного типа акселерометров.

### Список литературы

1. *Матвеев, В. В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов ; под общ. ред. д.т.н. В. Я. Распопова. СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. *Исаченко, В. Х.* Инклинометрия скважин. М. : Недра, 1987. 216 с.
3. *Мелешко, В. В.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. Кировоград : ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. 171 с.
4. *Симонов М. В.* Модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы для управления мобильным наземным роботом в сложных условиях / М. В. Симонов, А. А. Закиров, К. В. Шишаков // Приборостроение в XXI веке – 2018. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XIV Всероссийской НТК. 2018. С. 310–317.
5. *Папко, А. А. В.* Об исследовании повторяемости и воспроизводимости метрологических характеристик прецизионных акселерометров / А. А. Папко, И. В. Кирянина, И. В. Комбарова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1 (7). С. 21–24.
6. *Шишаков, К. В.* Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. 264 с.
7. *Устюгов, М. Н.* Калибровка акселерометра бесплатформенной инерциальной навигационной системы / М. Н. Устюгов, М. А. Щипицына // Вестник ЮУрГУ. 2006. № 14. С. 140–143.

A. A. Zakirov, postgraduate student

E-mail: zexeso@gmail.com

I. P. Kazakov, master student

E-mail: vanyakazakov@mail.ru

K. V. Shishakov, CSc in phys. and math, associate professor

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Static Calibration of a Block of Three Orthogonal Accelerometers

*The article is devoted to static calibration of structurally executed blocks of three orthogonal accelerometers to improve the accuracy of determining the projections of gravity on the coordinates associated with objects of a spatial orthogonal coordinate system. A production calibration stand was debugged with algorithmic software supporting two calibration methods: linear and nonlinear. For specific accelerometers, calibration was performed using these two methods and the results were compared. It is shown that for the selected precision accelerometers, it is sufficient to use a linear calibration technique.*

**Keywords:** Accelerometer, calibration, stand, algorithmic software, method.

УДК 621.391

*И. А. Кайсина*, аспирант

*В. В. Титов*, магистрант

*Д. С. Васильев*, канд. техн. наук, доц.

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

*А. Е. Кайсин*, канд. техн. наук, доц.

E-mail: irinakaysina25@gmail.com

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Экспериментальное исследование ретрансляции мультипоточковой передачи данных по стандарту WiFi 802.11g на частоте 2,4 ГГц в режиме Ad-Hoc**

*В статье проведено экспериментальное исследование влияния количества узлов-источников на качество обслуживания (Quality of Service – QoS) для самоорганизующейся сети. В качестве метрик используются коэффициент доставки пакетов (PDR), средняя задержка передачи IP-пакетов (IPTD) и полезная пропускная способность. В роли узлов-источников и узла-ретранслятора использовались микрокомпьютеры Raspberry Pi 3 B, в роли узла-получателя – ноутбук. Узлы-источники одновременно передавали потоковое видео на ноутбук с применением стандарта беспроводной связи WiFi 802.11g, метрики QoS измерялись на узле-ретрансляторе и узле-получателе. Результаты исследования показали, что увеличение узлов-источников негативно сказывается на метриках QoS.*

**Ключевые слова:** самоорганизующиеся сети, качество обслуживания, PDR, IPTD, Goodput.

#### **Введение**

Самоорганизующиеся сети принято разделять на три типа: MANET (mobile ad hoc network), VANET (vehicular ad hoc network) и FANET (flying ad hoc network) [1–8]. В роли узлов в сетях MANET выступают мобильные устройства, в VANET – автомобили, в FANET – беспилотные летательные аппараты. В последние годы большое внимание в исследованиях уделяется проблемам передачи потоковых данных в сетях FANET [10–17], которые находят все более широкое применение при выполнении различных миссий, в том числе в режиме чрезвычайных ситуаций. В режиме чрезвычайных ситуаций важна быстрая и качественная передача данных с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на наземную станцию, что может быть затруднительно при на-

личии одного узла-источника. Решением проблемы может являться использование нескольких узлов-источников для уменьшения времени выполнения миссии и возможности более качественной передачи данных. В этой связи важным является вопрос влияния количества узлов-источников на характеристики качества передачи данных, т. к. это ведет к увеличению нагрузки в летающей сети, вследствие чего могут возникать потери данных из-за перегруженности каналов. Потери данных могут возникать вследствие затухания широкополосного сигнала, используемого в беспроводной сети, и влияния радиочастотных помех. Вопросы обеспечения качества передачи информации с помощью широкополосных сигналов на физическом и канальном уровнях модели OSI рассматриваются в работах [18–21]. Для решения этого вопроса необходимо собрать тестовый стенд, который поможет определить основные зависимости между увеличением числа узлов-источников и метриками QoS.

В первой части статьи определены компоненты для создания тестового стенда, описан сценарий для проведения эксперимента. Во второй части статьи проведен анализ результатов исследований, представлены зависимости между числом узлов-источников и метриками QoS. В заключении приводится обоснование полученных результатов.

### Постановка эксперимента

Для экспериментального исследования влияния нескольких источников на метрики QoS была использована сеть, которая включает несколько однопалатных микрокомпьютеров Raspberry Pi 3 В в качестве узлов-источников и узла-ретранслятора, а также один ноутбук в качестве узла-получателя с сенсорным экраном. Выбор микрокомпьютеров был связан с тем, что они широко используются в беспилотных летательных аппаратах. На микрокомпьютерах была установлена операционная система Ubuntu Mate, на ноутбуке – Ubuntu 16.04. На всех узлах были произведены следующие настройки:

Таблица 1. Настройка сети

| SSID     | MS      |
|----------|---------|
| Стандарт | 802.11g |
| Режим    | Ad-Hoc  |
| Частота  | 2,462   |
| Канал    | 11      |

На каждом узле были заданы статические IP-адреса в соответствии с рис. 1. При постановке эксперимента узлы-источники напрямую не мог-

ли установить соединение с узлом-получателем, проверка проводилась с помощью команды ping. Выбор расстояния между узлами-источниками и узлом-ретранслятором, а также между узлом-ретранслятором и узлом-получателем основывался на анализе лог-файлов при значении коэффициента доставки пакетов (Packet Delivery Rate – PDR) 1, что гарантировало качественную передачу данных.

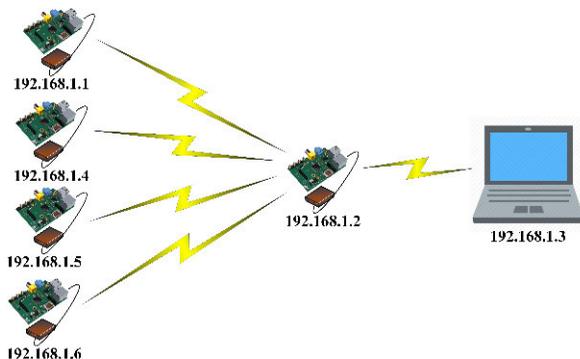


Рис. 1. Схема сети для проведения эксперимента

Для ретрансляции данных на всех узлах был включен протокол маршрутизации OLSR. Для корректной работы протокола были выполнены следующие шаги:

- загружен модуль протокола OLSR для ОС Linux;
- указан сетевой интерфейс, который использовался для создания сети;
- указаны необходимые настройки сети Wi-Fi;
- задан IP-адрес настраиваемого узла;
- выполнен перезапуск службы network-manager, отвечающий за сетевые соединения в ОС Linux.

В работе был исследован следующий сценарий: узлы-источники одновременно передавали данные на узел-получатель через узел-ретранслятор. В качестве данных было выбрано видео разрешения 360, что имитировало видео с борта БПЛА. Для передачи на узлах-источниках в программе VLC media player была запущена передача видео на сетевые порты узла-получателя 5005-5008 и соответствующий IP-адрес 192.168.1.3. На узле-получателе было открыто потоковое видео для зрительной оценки качества передачи. В качестве узла-получателя использовался ноутбук с сенсорным экраном для тактильной обратной связи с пользователем, это необходимо для оперативного изменения параметров отображения результатов экспе-

риментов. Вопросы важности применения телекоммуникационных систем с тактильной обратной связью рассматривались в работах [22–26]. Во время передачи был включен протокол маршрутизации OLSR. Для исследования характеристик QoS на узле-ретрансляторе и узле-получателе записывались лог-файлы через программу-анализатор сетевого трафика Wireshark. Всего было произведено 5 испытаний, длительность каждого испытания составляет одну минуту.

### Анализ результатов

Все собранные лог-файлы были проанализированы в программе Wireshark. Был проанализирован RTP-заголовок (Real-time Transport Protocol). В роли метрик QoS были выбраны: коэффициент доставки пакетов (Packet Delivery Rate – PDR), задержка передачи IP-пакетов (IP packet transfer delay – IPTD) и полезная пропускная способность (Goodput). Для расчета первой метрики использовалась формула

$$PDR = \frac{R_x}{T_x}, \quad (1)$$

где  $R_x$  – количество полученных пакетов;  $T_x$  – количество отправленных пакетов.

По рекомендации Международного союза электросвязи [14] для видео реального времени допустимой считается потеря одного пакета на 1000 переданных пакетов, т. е.  $PDR < 0,999$  считается неудовлетворительным. Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в виде зависимости PDR от числа узлов-источников на узле-ретрансляторе и узле-получателе.

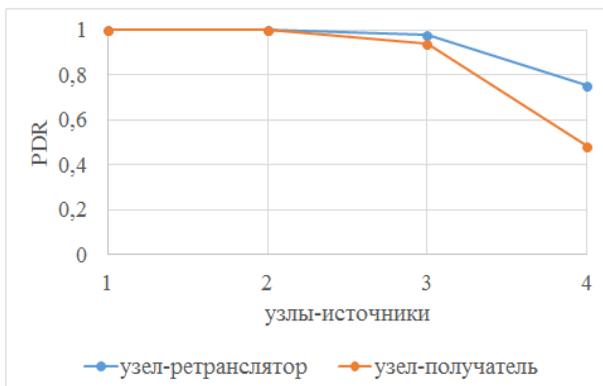


Рис. 2. График зависимости метрики PDR от числа узлов-источников на узле-ретрансляторе и узле-получателе.

Из графика на рис. 2 следует, что приемлемое значение метрики PDR сохраняется только при двух активных узлах-источниках. При увеличении числа узлов-источников до трех метрика PDR на узле-ретрансляторе равняется 0,977, на узле-получателе 0,938. При четырех узлах-источниках наблюдается более существенное падение значения PDR до 0,75 на узле-ретрансляторе и 0,481 на узле-получателе. При передаче от узла-ретранслятора до узла-получателя значение метрики PDR уменьшается, что может быть связано с настройками физического соединения (частотой, каналом, стандартом), программными особенностями (использование VLC v.2), а также переполнением буфера на узле-ретрансляторе.

Для узла-получателя также экспериментально исследована зависимость метрики IPTD от количества узлов-источников в процентах, результаты представлены на рис. 3.

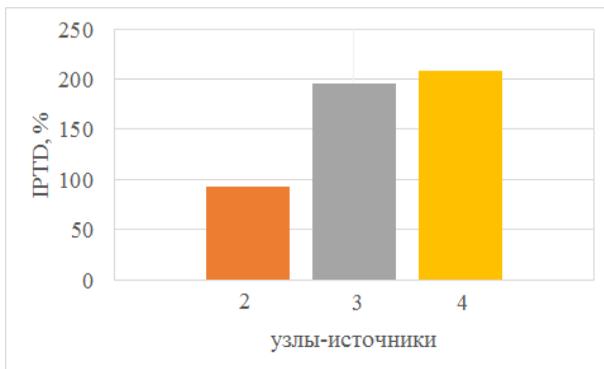


Рис. 3. График зависимости метрики IPTD от числа узлов-источников на узле-получателе

Из результатов на рис. 3 следует, что при увеличении узлов-источников увеличивается метрика IPTD. При двух узлах-источниках задержка IPTD на узле-получателе увеличилась на 93 %, при трех – на 194 %, а при четырех – на 208 % по сравнению с передачей с одного узла-источника (при одном узле-источнике IPTD = 100 %). Ухудшение метрики IPTD при увеличении числа узлов-источников может быть связано с увеличением потоковой нагрузки данных на узел-ретранслятор, что приводит к задержкам, связанным с ожиданием пакетов в буфере.

Была определена зависимость между количеством узлов-источников и метрикой Goodput (полезная пропускная способность) на узле-ретрансляторе и узле-получателе.

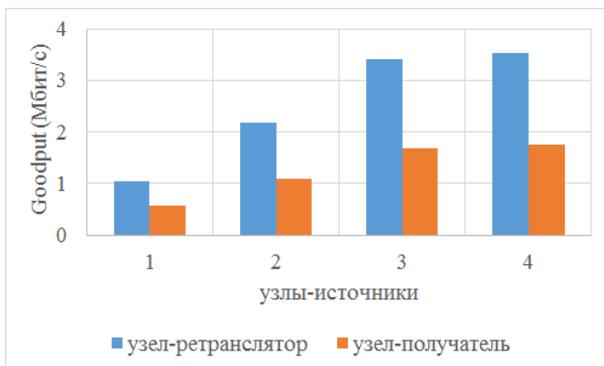


Рис. 4. График зависимости метрики Goodput от числа узлов-источников на узле-ретрансляторе и узле-получателе

Из результатов на рис. 4 следует, что при увеличении узлов-источников увеличивается метрика Goodput. Так, при одном узле-источнике Goodput на узле-ретрансляторе 1 Мбит/с, на узле-получателе 0,57 Мбит/с. При двух узлах-источниках на ретрансляторе 2,17 Мбит/с, на узле-получателе 1,1 Мбит/с. При трех узлах-источниках на ретрансляторе 3,4 Мбит/с, на узле-получателе 1,68 Мбит/с. При четырех узлах-источниках на ретрансляторе 3,58 Мбит/с, на узле-получателе 1,76 Мбит/с. Уменьшение метрики Goodput на узле-получателе связано с потерей пакетов на узле-ретрансляторе, о чем говорит график на рис. 2.

## Вывод

В статье был описан тестовый стенд для экспериментального исследования влияния нескольких узлов-источников на метрики QoS на узле-ретрансляторе и узле-получателе в самоорганизующейся сети, состоящей из микрокомпьютеров Raspberry Pi и ноутбука. В ходе исследований были определены зависимости между числом узлов-источников и данными метриками QoS: PDR, IPTD, Goodput. Были выявлено следующее:

1) при передаче данных между узлом-ретранслятором и узлом-получателем происходит потеря пакетов, о чем свидетельствует меньшее значение PDR на узле-получателе, т. к. увеличивается число узлов-источников, что вызывает перегрузки на узле-ретрансляторе;

2) увеличение числа узлов-источников увеличивает метрику IPTD, что может быть связано с переполнением буфера на узле-ретрансляторе;

3) увеличение числа узлов-источников увеличивает требования к метрике Goodput, метрика имеет меньшее значение на узле-получателе, что также связано с потерей пакетов.

Можно сделать вывод, что увеличение числа узлов-источников оказывает негативное влияние на метрики QoS из-за перегрузок на узле-ретрансляторе. Решением проблемы может являться увеличение числа узлов-ретрансляторов для балансировки нагрузки, а также использование различных алгоритмов на прикладном уровне для улучшения метрик PDR.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00218 мол\_а*

#### Список литературы

1. Протоколы геомаршрутизации самоорганизующихся мобильных сетей Д. Е. Прозоров и др. // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 5.
2. *Tareque M. H., Hossain M. S., Atiquzzaman M.* On the routing in flying ad hoc networks // 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). IEEE, 2015. Pp. 1-9.
3. *Бахтин, А. А.* Свойства и характеристики AdHoc сетей : учеб. пособие / А. А. Бахтин, А. В. Смирнов, О. П. Тимофеева. М., 2012. С. 88.
4. *Филиппов, А. Н.* Свойства и характеристики Ad Hoc сетей // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 522–525. URL <https://moluch.ru/archive/115/31245/> (дата обращения: 25.06.2019).
5. *Zanjireh M. M., Larijani H.* A survey on centralised and distributed clustering routing algorithms for WSNs // 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2015. Pp. 1-6.
6. *Toh, C. K.* Ad hoc mobile wireless networks: protocols and systems. Pearson Education, 2001. P. 336.
7. *Heen O., Guette G., Genet T.* On the unobservability of a trust relation in mobile ad hoc networks // IFIP International Workshop on Information Security Theory and Practices. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. Pp. 1-11.
8. *Hagenauer F. et al.* Poster: Using clusters of parked cars as virtual vehicular network infrastructure // 2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). IEEE, 2016. Pp. 1-2.
9. *Васильев, Д. С.* Протоколы маршрутизации в MANET / Д. С. Васильев, А.В. Абилов // Электросвязь. 2014. № 11. С. 52–54.
10. *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.
11. Сравнительный анализ эффективности ретрансляции потоковых данных в летающей сети / И. А. Кайсина и др. // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, №. 1. С. 108–115.

12. *Смирнов, С. В.* Анализ исследований в области авиационной радиосвязи и обоснование перспективных путей совершенствования сетей радиосвязи управления авиацией с авиационного комплекса радиолокационного дозора и наведения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3.

13. *Пономорев, А. В.* Анализ исследований и обоснование задач развития авиационных сетей воздушной радиосвязи боевого управления авиацией за счет адаптации каналов управления летательными аппаратами к параметрам передаваемого в них трафика // Экономика и качество систем связи. 2018. № 2 (8).

14. *Леонов, А. В.* Исследование возможности применения протокола BeeAdHoc для решения задачи маршрутизации в FANET / А. В. Леонов, Г. А. Литвинов // Современные проблемы телекоммуникаций. 2018. С. 571–578.

15. *Vasilev D. S., Abilov A. V., Khvorenkov V. V.* Peer selection algorithm in flying ad hoc networks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2016). Proceedings. 2016. Pp. 382–386.

16. *Vasiliev D. S., Abilov A.* Relaying algorithms with ARQ in flying ad hoc networks // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). Proceedings. 2015.

17. *Vasiliev D. S., Vladykina K., Abilov A.* Simulation study of application layer relaying algorithms with data-link ARQ in Flying Ad Hoc Networks // Proceedings of the 19th conference of open innovations association FRUCT 2016. Pp. 256–263.

18. Методы синтеза составных частотно-временных сигналов / М. Л. Никитин, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, А. А. Богданов, А. В. Жидяев // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2015. Т. 18, № 3. С. 93–97.

19. Синтез составного дискретно-частотного сигнала / А. Н. Копысов, И. З. Климов, Ю. Т. Загидуллин, В. А. Мошонкин, А. А. Богданов // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 95–98.

20. *Копысов, А. Н.* Измерительный стенд для записи сигналов с широкополосной несущей // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2006. № 1. С. 57–60.

21. *Бабинцев, Е. С.* Структурная скрытность дискретно-частотного и многочастотного широкополосных сигналов / Е. С. Бабинцев, А. Н. Копысов, И. З. Климов // Интеллектуальные системы в производстве. 2010. № 2 (16). С. 109–113.

22. *Барбашин, Д. И.* Моделирование передней панели телекоммуникационных устройств / Д. И. Барбашин, А. И. Нистюк // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 163–165.

23. *Васильев, О. И.* Телекоммуникационные устройства с тактильной обратной связью / О. И. Васильев, О. С. Карпов, А. И. Нистюк // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. С. 364–367.

24. *Нистюк, А. И.* Технология тактильных ощущений объема изображений на сенсорном экране // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 2. С. 120–122.

25. Nistyuk, A. Mathematical base of technology of tactile feedback in devices with the touch screen // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013. Proceedings. 2013.

26. Нистюк, А. И. Программно-аппаратный комплекс для исследования сложных телекоммуникационных систем и систем управления // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1. С. 149–152.

27. ITU-T Rec. Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. 12/2011. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I> (дата обращения: 28.07.2019).

I. A. Kaysina, postgraduate student

V. V. Titov, master student

D. S. Vasilyev, CSc in engineering, associate professor

A. B. Абилов, CSc in engineering, associate professor

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

E-mail: irinakaysina25@gmail.com

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **An Experimental Study of Multi-Stream Data Relaying in Ad-Hoc Network Based on 802.11g at 2.4 GHz**

*In the article, we have considered the influence of increasing number of sources in ad-hoc networks on Quality of Service (QoS) metrics. As metrics were chosen: Packet Delivery Rate (PDR), IP packet transfer delay (IPTD) and Goodput. For estimating metrics, we made testbed, which included: microcomputers Raspberry Pi 3 B (as source and relay nodes) and laptop (as destination). Sources was streaming video via relay, metrics was measured on relay and destination. We made conclusion that increasing number of sources negative effects on QoS metrics.*

**Keywords:** Ad-hoc networks, QoS, PDR, IPTD, Goodput.

---

УДК 004.02

*А. П. Калистратов*, аспирант  
*Г. И. Афанасьев*, канд. техн. наук, доц.  
E-mail: akalistratov@gmail.com

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

### **Постановка задачи выбора оптимальной виртуальной машины для решения вычислительных задач предприятия**

*В работе описывается вопрос представления управленческой задачи планирования приобретения вычислительных ресурсов предприятия как математической задачи линейного программирования. Приводится краткое описание существующих подходов к принятию решений и производится постановка задачи выбора оптимальной виртуальной машины.*

**Ключевые слова:** виртуальные машины, виртуализация, целочисленное программирование, задача оптимизации

#### **Введение**

Производственная деятельность любого предприятия в настоящее время невозможна без применения различных информационных систем, функционирование которых обеспечивается вычислительными системами (ВС). В зависимости от масштабов предприятия, требований к коэффициенту готовности и производительности ВС определяются как количественные требования к вычислительным ресурсам, из которых состоит ВС (количество процессорных ядер, их частота, объем оперативной памяти, объем устройств хранения данных и т. д.), так и качественные требования, например, применение виртуализации или использование физических вычислительных ресурсов. В данной статье представлен способ выбора виртуальной ВС (виртуальной машины), в котором процесс выбора сводится к решению задачи целочисленного программирования.

#### **Предпосылки**

Принятие решения о приобретении тех или иных ВС является важной частью деятельности предприятия, т. к. неверный выбор влечет за собой либо дополнительные затраты на эксплуатацию, либо приобретение новых ВС.

Эксперты (как в бизнес-среде, так и в научной среде) отмечают, что все больше популярности набирает подход, связанный с отказом от капитальных вложений в приобретение физических ВС и переход к аренде вычислительных мощностей в виде виртуальных машин в так называемой облачной среде [1–3].

Несмотря на то, что арендуемые виртуальные машины (ВМ) можно быстро перенастраивать и менять тем самым доступный набор вычислительных ресурсов, некачественное функционирование информационных систем вследствие недостатка ресурсов может принести убыток предприятию, равно как принесет убыток и избыточное количество арендованных ресурсов, т. к. стоимость аренды ВМ пропорциональна количеству ее ресурсов. Таким образом, задача планирования аренды ресурсов является управленческой задачей, решение которой может быть произведено как на основе экспертных оценок (метод Дельфи, метод Борда), так и на основе методов теории принятия решений (метод анализа иерархий) или математических методов [4, 5]. Так как результаты экспертных оценок полностью зависят от выполняющих их людей-экспертов, автором предлагается привести задачу выбора ВМ к математическому виду, что позволит минимизировать человеческий фактор в решении. С точки зрения управления смысл задачи – минимизировать стоимость набора приобретаемых вычислительных ресурсов при удовлетворении заранее заданных требований к вычислительным ресурсам. Требования к вычислительным ресурсам могут быть получены как путем экспертизы, так и путем моделирования или натуральных экспериментов [6].

### Постановка задачи

Примем, что известен портфель ВМ – перечень доступных к приобретению уникальных видов ВМ из  $i$  штук:  $VM_1, VM_2, \dots, VM_i$ . ВМ в портфеле обладают характеристиками уникальных вычислительных ресурсов  $R$  в количестве  $j$  штук:  $R_1, R_2, \dots, R_j$ .

Предположим, что для любого типа виртуальной машины существует  $VM_i = \{R_{1,1}, R_{1,2}, \dots, R_{i,j}\}$  и все технические характеристики, т. е. ресурсы ВМ известны. Портфель ВМ в этом случае может быть представлен в виде таблицы или матрицы.

### Портфель ВМ в табличном виде

|       |           |     |           |
|-------|-----------|-----|-----------|
|       | $VM_1$    | ... | $VM_i$    |
| $R_1$ | $R_{1,1}$ |     | $R_{i,1}$ |
| ...   |           |     |           |
| $R_j$ | $R_{1,j}$ |     | $R_{i,j}$ |

Представление портфеля ВМ в таком виде позволяет составить матрицу размера  $i \times j$ , содержащую в себе численные значения всех доступных к приобретению вычислительных ресурсов:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{i,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1,j} & \cdots & R_{i,j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Для дальнейшей формализации задачи необходимо знать требования к ВС. Предположим, что они уже получены и нам известен список требований к ресурсам (назовем его ресурсным планом) на срок аренды ВМ. Соответственно, в нашем распоряжении должно находиться как минимум  $n_1$  ресурсов типа  $R_1$ ,  $n_2$  ресурсов типа  $R_2$ , ...,  $n_j$  ресурсов типа  $R_j$ , распределенных по  $m$  экземплярам приобретаемой ВМ. Это позволит нам составить ресурсный план вида  $N = (n_1, n_2, \dots, n_j)$ , который будет являться вектором ограничений в поставленной задаче. Выбор же будет производиться из векторов  $m^T = (m_1, m_2, \dots, m_i)$ , составляющих портфель ВМ.

Появление вектора ограничений позволяет составить систему ограничений  $A$ , которой должна удовлетворять подобранная ВМ:

$$\begin{aligned} R_{11}m_1 + R_{12}m_2 + \cdots + R_{1j}m_j &\geq n_1; \\ R_{21}m_1 + R_{22}m_2 + \cdots + R_{2j}m_j &\geq n_2; \\ &\dots \\ R_{i1}m_1 + R_{i2}m_2 + \cdots + R_{ij}m_j &\geq n_j. \end{aligned} \quad (2)$$

Так как в процессе работы предприятия приходится работать не с абстрактными ресурсами и машинами, а с вполне понятной и реальной предметной областью, дополнительно вводятся ограничения: все значения переменной  $m$  неотрицательны и являются целыми числами, т. к. заказать отрицательное или дробное число ВМ невозможно.

$$\begin{aligned} m_1 \geq 0, m_2 \geq 0, \dots, m_j \geq 0. \\ m_j \in Z.^n \end{aligned} \quad (3)$$

Так как результатом решения задачи должно являться получение наиболее дешевого набора ресурсов из портфеля ВМ, добавим еще один критерий – стоимость аренды набора на заданный период времени.

Известно, что затраты на аренду  $VM_1, VM_2, \dots, VM_i$  на заданный период времени составляют  $c_1, c_2, \dots, c_i$ . Стоимость выбранного набора векторов  $m^T$  из портфеля составит:

$$c^T m = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_i m_i \quad (4)$$

С учетом всех ограничений задача выбора оптимальной виртуальной машины для решения вычислительных задач предприятия с известным потреблением вычислительных ресурсов на некоторый период времени будет заключаться в следующем:

$$\begin{aligned} c^T m &\rightarrow \min, \\ Am &\geq N \\ m &\gg 0 \\ m_j &\in Z^n \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, задача приведена к каноническому виду задачи целочисленного линейного программирования. Формально задача будет выглядеть следующим образом: необходимо выбрать такой вектор  $m$ , который будет удовлетворять условиям (2) и (3) и при этом иметь минимальное значение (4).

Так как данная задача относится к классу задач целочисленного линейного программирования, она может быть решена различными методами, например, методом Гомори или вариациями метода ветвей и границ.

### Выводы

В данной работе произведена постановка задачи выбора оптимальной виртуальной машины для решения заданного класса вычислительных задач, сводящейся к решению задачи целочисленного линейного программирования. Использование этого способа вместо экспертной оценки может позволить сократить затраты на приобретение временных вычислительных ресурсов. Темой дальнейших изысканий автора является оценка повышения точности выбора и итогового экономического эффекта от применения данного подхода.

### Список литературы

1. Савинова, М. Oracle Cloud Day 2017: клиенты и Oracle рассказали о совместных планах по переходу в облако [Электронный ресурс] // Блог Oracle в России и СНГ [Сайт]. URL: <https://blogs.oracle.com/russia/oracle-cloud-day-2017> (дата обращения: 26.07.2019).
2. Исследование TAdviser: Ключевые игроки рынка облачных сервисов в России // TAdviser [Сайт]. URL: <http://www.tadviser.ru/a/366892> (дата обращения: 26.07.2019).

3. Мурзин, Ф. А. Облачные технологии: основные модели, приложения, концепции и тенденции развития / Ф. А. Мурзин, Т. В. Батура, Д. Ф. Семич // Программные продукты и системы. 2014. №3 (107). С. 64–72. doi: 10.15827/0236-235X.107.064-072.

4. Фисунов, К. В. Роль экспертных оценок в процессе принятия управленческих решений // Вестник ГУУ. 2013. №4. С. 253–257.

5. Коробов, В. Б. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / В. Б. Коробов, А. Г. Тутьгин // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2010. № 122. С. 108–115.

6. Калистратов, А. П. Методика поиска точки насыщения для однопоточной вычислительной системы // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. : в 12 т. Т. 2 / под общ. ред. А. А. Большакова. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. 144 с.

A. P. Kalistratov, postgraduate student

G. I. Afanasiev, CSc in engineering, associate professor

E-mail: akalistratov@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### **Problem Statement for the Optimal Virtual Machine Choice for Solution of Computational Problems in the Enterprise**

*The paper describes the topic of the solution of the management problem of planning the acquisition of computing resources as a mathematical problem of linear programming. A brief description of the existing approaches to decision-making is given and the problem of choosing the optimal virtual machine is formulated.*

**Keywords:** virtual machines, virtualization, linear programming, optimization problem

УДК 621.391

*К. Ю. Красноперов*, студент  
E-mail: kostya31539@yandex.ru

*Г. И. Ильязова*, студент

*И. А. Кайсина*, аспирант

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Обзор стохастических процессов как моделей трафика**

Статья отозвана на основании заявления авторов в связи с публикацией основного ее содержания в другом издании.

Пустая страница.

---

УДК 621.314.25

М. А. Подсизерцев, аспирант

E-mail: podsizertsev@ya.ru

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

К. О. Максимов, нач. сектора

ООО «ИРЗ-ТЕСТ»

## Проблемы обеспечения заданных параметров элементов с фрактальным импедансом на высоких частотах

*В работе проведен анализ конструкции образцов элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ), изготовленных по толсто пленочной технологии. Было установлено, что конструктивно-технологические ограничения, определяемые принятой технологией изготовления, вносят изменения в схмотехническую модель ЭФИ, полученную в результате синтеза ЭФИ. Проведено моделирование схемы замещения ЭФИ в программе OrCAD с учетом конструктивных особенностей образца. ФЧХ импеданса уточненной модели ЭФИ достаточно хорошо совпадает с измеренной ФЧХ образца ЭФИ. Предложены меры по повышению воспроизводимости результатов синтеза ЭФИ после изготовления образцов.*

**Ключевые слова:** элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ), RC-элементы с распределенными параметрами, схмотехническая модель ЭФИ, фазочастотная характеристика импеданса ЭФИ, схмотехническое моделирование.

### Введение

В работе [1] рассмотрена методика проектирования толсто пленочных элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ) на основе резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами (RC-ЭРП) со структурой слоев вида R-C-NR (резистивный слой 1-диэлектрик-резистивный слой 2) по заданной ФЧХ импеданса. По этой методике были спроектированы ЭФИ на уровне постоянства фазы  $\varphi_c -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ$  и  $-40^\circ$ , сохраняющие свое постоянство с неравномерностью  $\Delta\varphi = \pm 1,5$  в пределах не менее одной частотной декады.

Однако после изготовления образцов ЭФИ по толсто пленочной технологии было обнаружено, что измеренные ФЧХ импедансов всех образцов имеют заметный спад на высоких частотах начиная примерно

с 10 кГц, что заметно ограничивает диапазон рабочих частот, при котором данный элемент сохраняет свойства, характерные для ЭФИ.

Целью данной работы является анализ причин спада ФЧХ импеданса ЭФИ на высоких частотах и поиск решений, которые бы способствовали повышению воспроизводимости результатов синтеза после изготовления образцов.

### Решение задачи

Для анализа выберем вариант ЭФИ с  $\varphi_c = -30^\circ$ , синтезированная схема замещения которого и его конструктивная модель изображены на рис. 1.

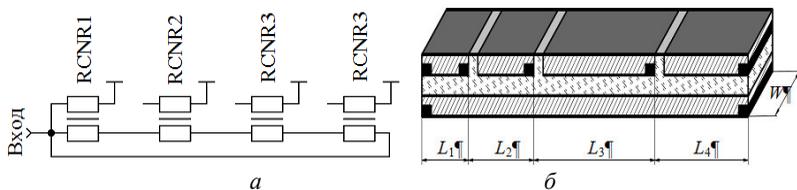


Рис. 1. ЭФИ на основе RC-ЭПП со структурой слоев вида R-C-NR:  
а – схема замещения; б – конструктивная модель

На рис. 2, а изображен топологический чертеж спроектированного ЭФИ, а на рис. 2, б – фото изготовленного образца.

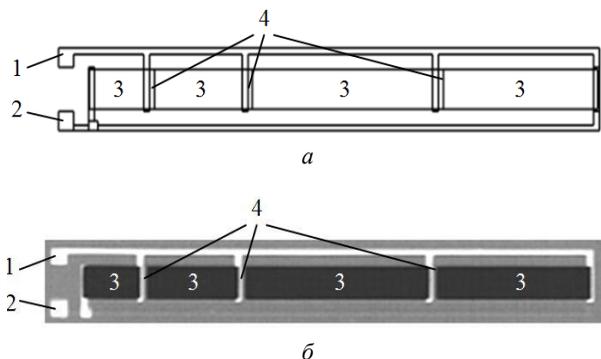


Рис. 2. ЭФИ на основе RC-ЭПП со структурой слоев вида R-C-NR: а – топологический чертеж; б – фото изготовленного образца (1 – проводники с контактами к верхнему резистивному слою, 2 – проводники с контактами к нижнему резистивному слою, 3 – верхний резистивный слой, 4 – разрывы в резистивном слое)

На рис. 3 представлена ФЧХ импеданса ЭФИ, соответствующая синтезированной модели (кривая 1) и измеренная после изготовления образца (кривая 2).

Из рис. 3 видно, что до 20 кГц графики ФЧХ совпадают, а затем наблюдается расхождение уровня фазы примерно на  $5^\circ$  и, начиная со 100 кГц, происходит довольно резкое падение фазы.

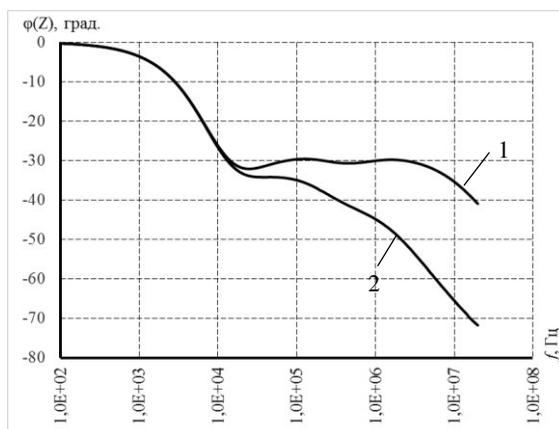


Рис. 3. Графики ФЧХ импеданса ЭФИ с  $\varphi_c = -30^\circ$ : *a* – синтезированной модели; *б* – измеренная у образца

Анализируя конструктивную модель ЭФИ (рис. 1, *б*) и топологический чертеж (рис. 2, *a*), можно отметить, что схема замещения не отражает конструктивные особенности разработанной и изготовленной по этому чертежу конструкции ЭФИ. В первую очередь не учитывается характер участков конструкции, в которых имеются контактные площадки к резистивным слоям. Например, участки, в которых контактные площадки к верхнему и нижнему резистивным слоям перекрываются между собой, образуют фактически обычные плоско-параллельные конденсаторы со структурой вида 0-С-0. Участки, в которых имеются контакты только к верхнему или к нижнему резистивным слоям, образуют структуры вида R-С-0. Кроме того, если в одном из резистивных слоев есть разрыв, а в этом месте в другом резистивном слое разрыва нет, то в этом слое образуется участок с чисто активным сопротивлением ( $R_в$  или  $R_n$ ).

Такие участки возникают из-за конструктивно-технологических ограничений, определяемых правилами выполнения топологии для конкретной технологии [2]. Поэтому эти участки будем называть «технологическими». В настоящее время при синтезе конструкции ЭФИ техно-

логические участки не учитываются, полагая, что схема замещения, изображенная на рис. 1, *a* полностью реализует заданную частотную характеристику импеданса ЭФИ.

На самом же деле схема замещения должна строиться на основе конструкции ЭФИ с учетом технологических участков, которые изображены на рис. 4. В соответствии с этим схема замещения, выполненная в программе OrCAD, будет иметь вид, показанный на рис. 5

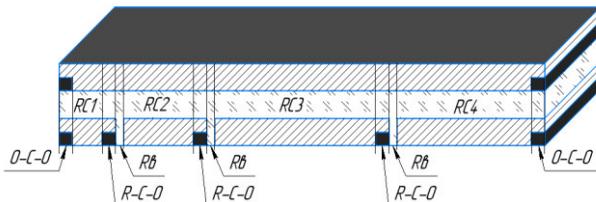


Рис. 4. Технологические структуры, возникающие в конструкции ЭФИ

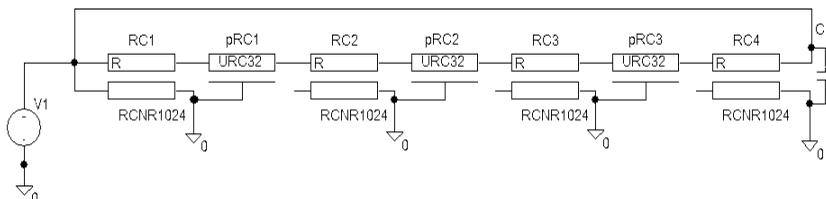


Рис. 5. Уточненная имитационная модель ЭФИ с учетом технологических участков

Для моделирования такой схемы необходимо оценить параметры структур, образуемых технологическими участками. Для расчетов будем пользоваться следующими данными [1]: ширина верхнего и нижнего резистивных слоев одинакова и равна 2 мм; ширина контактов к резистивным слоям также одинакова и равна 0,4 мм; ширина зазоров в резистивных слоях равна 0,3 мм; удельная емкость диэлектрика  $C_{уд} = 52$  пФ/мм<sup>2</sup>; сопротивление квадрата верхнего и нижнего резистивных слоев 7 кОм и 42 кОм, соответственно.

С учетом этих данных получим: емкость, образованная между концевыми контактами 41,6 пФ; параметры R-C-O-структур, образованных верхним резистивным слоем и контактными площадками к секциям нижнего резистивного слоя 1,4 кОм и 41,6 пФ, соответственно; параметры активных сопротивлений в участках над разрывами нижнего резистивного слоя 1,05 кОм [3]. Поскольку технологические участки обра-

зуются в областях, предположительно занимаемых R-C-NR-структурами, то их реальная длина должна быть уменьшена на сумму длин технологических участков, прилегающих к этим структурам.

Результаты моделирования фазы входного импеданса с помощью схемотехнической модели ЭФИ с учетом структур технологических участков показаны на рис. 6.

Видим, что в этом случае ФЧХ модели ЭФИ (кривая 2) очень близка к измеренной ФЧХ изготовленного образца (кривая 1). Следовательно, можно сделать вывод, что для обеспечения заданных параметров синтезированного ЭФИ после его изготовления необходимо уже при синтезе учитывать характер технологических участков, используя методику анализа получающейся конструкции, описанную выше.

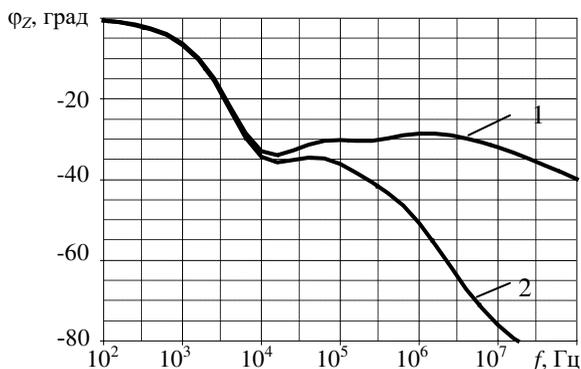


Рис. 6. Графики ФЧХ импеданса модели ЭФИ: 1 – без учета технологических участков; 2 – с учетом технологических участков

Паразитные свойства контактов могут быть смоделированы конденсаторами с сосредоточенными параметрами (или структурами 0-C-0) в случае, когда контакты находятся друг над другом. Когда контакт находится выше или ниже резистивного слоя, могут использоваться структуры 0-C-NR или R-C-0. Если один из слоев является непрерывным, а второй слой имеет разрыв, зазоры между слоями моделируются продольными сопротивлениями.

Однако можно предложить и еще один способ уменьшения завала ФЧХ на высоких частотах, который, как предполагается, в основном определяется шунтирующими емкостями, образующимися в том случае, если контактные площадки к резистивным слоям расположены друг над другом. Для этого необходимо до изготовления образца доработать то-

пологий, сдвинув контактные площадки в таких участках друг относительно друга на ширину контактной площадки, как показано на рис. 7.

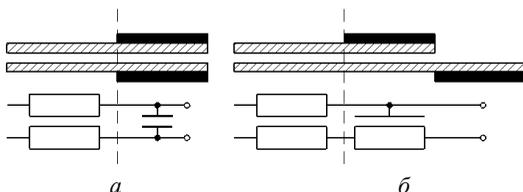


Рис. 7. Пример доработки топологии ЭФИ для уменьшения влияния технологических участков вида 0-C-0: *a* – участок до доработки; *б* – участок после доработки

В данном случае нижний резистивный слой расширяется на длину контакта, так что структура 0-C-0 преобразуется в структуру 0-C-NR.

На рис. 8 показан результат моделирования ЭФИ, в схеме замещения которого конечная емкость была заменена на структуру вида 0-C-NR. Из графиков видно, что смещение контактных площадок заметно уменьшает спад ФЧХ на высоких частотах

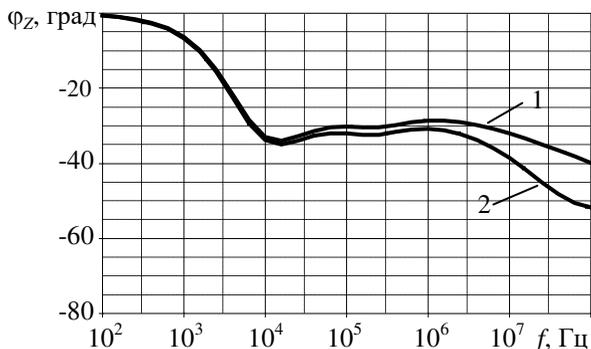


Рис. 8. Графики ФЧХ импеданса модели ЭФИ: 1 – теоретическая модель; 2 – модифицированная имитационная модель ЭФИ

### Заключение

В результате анализа конструктивных особенностей изготовленного образца ЭФИ, выполненного на основе комбинации РС-ЭРП со структурой слоев вида R-C-NR, было обнаружено, что схема замещения ЭФИ, полученная при синтезе, не отражает эти конструктивные особенности. Было проведено моделирование ЭФИ со схемой замещения, в

которой учтены конструктивно-технологические ограничения при разработке топологии ЭФИ. Результаты моделирования показали, что неучет этих особенностей при синтезе схемотехнической модели ЭФИ и приводит к заметному спаду ФЧХ изготовленного образца ЭФИ. Предложены меры по повышению воспроизводимости результатов синтеза после изготовления образцов.

### Список литературы

1. Гильмутдинов, А. Х. Проектирование и изготовление фрактальных элементов на основе одномерных RC-ЭРП со структурой слоев вида R-C-NR / А. Х. Гильмутдинов, К. О. Максимов, А. П. Ушаков // Нигматуллинские чтения-2018 : Междунар. науч. конф. 9–12 окт. 2018 г. : тез. докл. Т. 1. Казань : Изд-во АН РТ, 2018. С. 62–65

2. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование : учеб. пособие для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» и «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры» / Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев и др.; под ред. Л. А. Коледова. М. : Высш. шк., 1984. 231 с. : ил.

3. Недорезов, В. Г. Резистивные пасты на основе нанодисперсных порошков соединения рутения / В. Г. Недорезов, С. В. Подшибякин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза : Пензенский государственный университет, 2010. С. 70–75.

M. A. Podszertsev, postgraduate student

E-mail: podszertsev@ya.ru

P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

K. O. Maksimov, head of sector

ООО «IRZ-Test»

### Problems of Ensuring the Specified Parameters of Elements with Fractal Impedance at High Frequencies

*In this paper the design of samples of thick-film elements with fractal impedance (EFI) was analyzed. It was found that the manufacturing technology limitations affect changes to the circuit model of the synthesized EFI. The equivalent EFI scheme simulation was carried out in OrCAD with taking into account the design features of the sample. The impedance phase response of the refined EFIs model coincides quite well with the measured phase response of the EFI sample. The measures to improve the reproducibility of EFIs synthesis results after the samples manufacture were proposed.*

**Keywords:** Elements with fractal impedance (EFI), RC-elements with distributed parameters, EFI circuit model, EFIs impedance phase response, circuit simulation.

УДК 621.396

*А. С. Раев*, магистрант

*Ю. Т. Загидулин*, ст. преподаватель

*А. Н. Копысов*, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника»

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

E-mail: tema.raev2018@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

### **Разработка методики и оценка характеристик SDR-модулей, входящих в состав стенда цифровой антенной решетки**

*Статья посвящена описанию стендового оборудования для работы с радиолокационными сигналами. Целью статьи является разработка методики и проведение проверочных испытаний для оценки технических характеристик приемных каналов SDR-модулей стенда цифровой антенной решетки. Описаны основные технические характеристики приемных каналов SDR-модулей. В результате выявлено, что в приемных каналах присутствует ослабление 6,5 дБ на центральной частоте при неравномерности в полосе  $\pm 4\text{МГц}$  в 2–3 дБ.*

**Ключевые слова:** SDR, цифровая антенная решетка, USRP X310, UBX-160, TwinRX-80, OFDM, Rohde&Schwarz SMU 200A, MATLAB, LabVIEW.

#### **Введение**

Интенсивное развитие цифровой техники, а в частности технологии Software-defined radio (SDR), привело к появлению цифровых методов формирования диаграммы направленности антенны для радиолокационной техники. Данный путь развития радиолокационных систем привел к тому, что радиолокационные структуры стали конструироваться в виде стендов цифровых антенных решеток (ЦАР) (рис. 1). ЦАР как системы обнаружения имеют не только достаточно малые габариты относительно аналоговых систем, но также возможность быстрого программирования данных моделей под определенные задачи, не меняя самой конструкции системы, а лишь корректируя алгоритмы работы.

#### **Постановка цели и задач**

Стенд ЦАР включает в себя [1]:

1. Антенную решетку: 1 передатчик (TX) x 4 приемника (RX).
2. SDR-модули. Применены SDR-приемо-передатчики модели USRP X310:

а) для формирования зондирующего сигнала применяется SDR-модуль USRP X310 с дочерними платами UBX 160MHz;

б) для приема и преобразования отраженного сигнала применяется USRP X310 на 4 приемных каналах с дочерними платами TwinRX 80MHz.

3. Персональный компьютер (ПК). ПК необходим как для разработки и загрузки в SDR-модули алгоритмов излучения и приема сигналов, так и для сбора и обработки принятых данных.

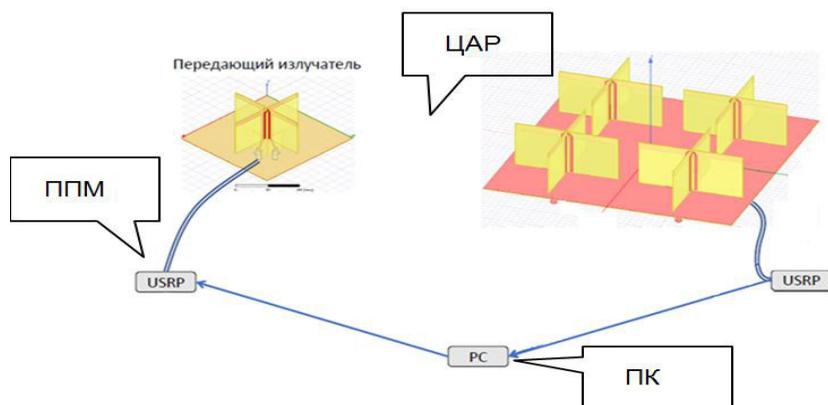


Рис. 1. Структура стенда ЦАР

Для корректной работы разработанного стенда ЦАР необходимо оценить его основные характеристики, а точнее характеристики SDR-модулей данной системы.

Цель данного исследования состояла в проведении проверочных испытаний для оценки технических характеристик приемных каналов SDR-модулей.

В результате поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики проверочных испытаний стенда ЦАР для оценки технических характеристик приемных каналов SDR-модулей.
2. Проведение испытаний согласно методике для оценки технических характеристик стенда ЦАР и оценка результатов.

### Теоретические сведения

В качестве основных технических характеристик SDR-модулей выступают амплитудно-частотная характеристика каналов (АЧХ), фазо-частотная характеристика каналов (ФЧХ) и групповое время запаздыва-

ния каналов (ГВЗ). Для оценки данных характеристик необходимо произвести прием широкополосного сигнала в заданной полосе частот и на основе принятых отсчетов построить графики соответствующих характеристик. К основным из необходимых параметров, который должен иметь сигнал, относится низкий пик-фактор (PAR) [2]. Важной задачей является обеспечение качественного приема информации по каналам связи. Это достигается как на физическом и канальном уровне модели OSI (методы приема широкополосного сигнала), так и на вышестоящих уровнях (методы маршрутизации, доставки пакетов данных и т. д.). Вопросы обеспечения качества приема информации на вышестоящих уровнях модели OSI (сетевой и прикладной) рассматриваются в работах [3–7]. Однако не менее важным является качество приема широкополосного сигнала с применением SDR-модулей для функционирования цифровой антенной решетки.

Известно, что сигналы с ЛЧМ обладают высокой энергетической эффективностью (пик-фактор порядка 3 дБ). Крайней противоположностью им являются сигналы с OFDM [8], пик-фактор которых достигает значений порядка единиц-десятков децибел.

Для того чтобы рассматривать сигнал с OFDM в качестве зондирующего, необходимо добиться снижения значения его пик-фактора с помощью методов минимизации. Одним из примеров данных методов является формирование сигналов по алгоритму, описанному Ньюменом.

Суть представленного метода заключается в получении дискретной фазовой характеристики сигнала с OFDM путем аппроксимации исходного ЛЧМ-сигнала дискретными комплексными отсчетами в частотной области [9]. Фактически зондирующий сигнал формируется как сигнал с OFDM, однако, задав квадратичный закон распределения фазы каждого символа в соответствии с законом изменения фазы ЛЧМ сигнала, полученный сигнал будет иметь вид ЛЧМ.

На рис. 2 изображено временное представление сигналов, сформированных по методам Ньюмена и Шродера.

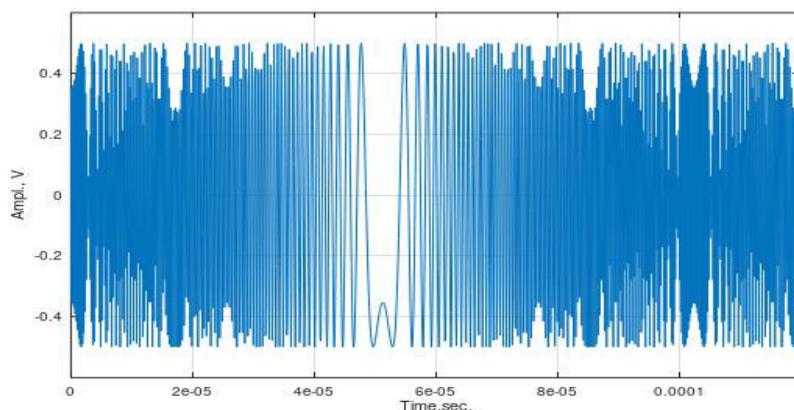


Рис. 2. Временное представление сигнала

Информация о технических характеристиках приемных каналов SDR-модулей стенда цифровой антенной решетке анализируется с помощью программных средств и отображается на экране монитора. Для оперативного изменения параметров отображения результатов экспериментов важно применение экранов с тактильной обратной связью с пользователем. Вопросы важности применения телекоммуникационных систем с тактильной обратной связью рассматривались в работах [10–14].

### **Разработка методики проверочных испытаний стенда ЦАР для оценки технических характеристик SDR-модулей**

В рамках испытаний производился прием сформированного эталонного OFDM-сигнала с фазами Ньюмена от векторного генератора Rohde&Schwarz SMU 200A, принимаемого четырехканальным приемником, работающим на частоте 1,5 ГГц и подключенным к векторному генератору через эквивалент канала связи 30 дБ.

Согласно данному алгоритму материально-техническое обеспечение испытаний включает в себя:

- векторный генератор Rohde&Schwarz SMU 200A 1 шт.
- USRP X310 1 шт.
- TwinRX 80 MHz 2 шт.
- аттенюатор Mini-Circuits 15542-30 дБ 1 шт.

Эталонный сигнал имел основные параметры:

- Количество поднесущих: 1024
- Частота дискретизации, МГц: 10
- количество символов в пачке: 1000.

- ширина полосы сигнала, МГц: 10.
- уровень сигнала, dBm: 0.

Сигнал с данными параметрами формируется в программе MATLAB [15] и записывается в файл формата wav. Далее преобразуется в требуемый для генератора формат с помощью программы R&S ARB Toolbox и с помощью flesh-накопителя записывается на генератор.

Сформированный сигнал излучается на несущей частоте 1,5 ГГц по коаксиальному кабелю через эквивалент канала 30 дБ на четырехканальный приемник USRP X310 с платами TwinRX-80, поочередно на каждый из четырех каналов. Средствами программы LabVIEW [16] устройство USRP X310 производит запись принятого сигнала через оптический канал Ethernet 10 Gbit в файл формата wav.

Структура обеспечения записи данных в программе LabVIEW представлена на рис. 3.

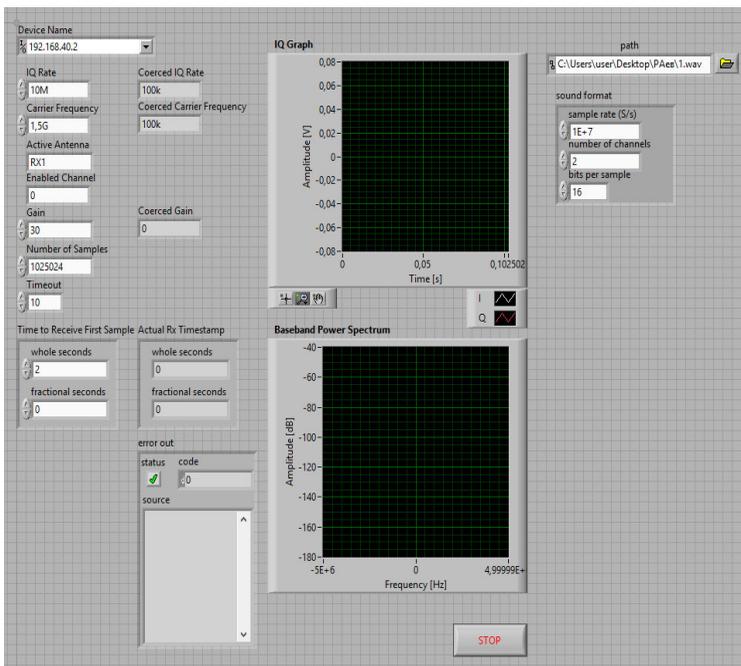


Рис. 3. Лицевая панель реализации записи сигнала в программе LabVIEW

Над файлом, в котором записан принятый сигнал, осуществляется алгоритм анализа, заложенный в программе MATLAB, и сравниваются

характеристики эталонного и принятого файлов. Алгоритм включает в себя выражения для нахождения передаточной характеристики, которая в свою очередь включает в себя основные анализируемые характеристики: модуль передаточной характеристики – АЧХ, фазу передаточной характеристики – ФЧХ, первую производную ФЧХ по частоте – ГВЗ. Далее сравниваются все каналы приема между собой.

Согласно описанной методике построена блок-схема описанного алгоритма для оценки технических характеристик стенда, реализующего ЦАР. Данная блок-схема представлена на рис. 4.

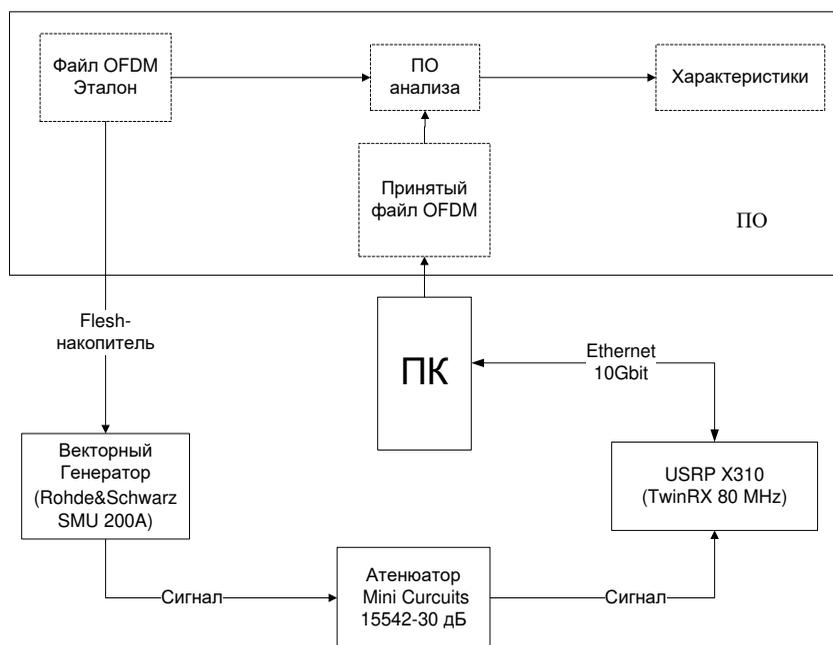


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оценки технических характеристик стенда, реализующего ЦАР

### Испытания стенда и их результаты.

Испытания стенда, реализующего ЦАР, проводились согласно описанной методике в лабораторных условиях при нормальных значениях окружающей среды (температура, влажность, давление, и т.д.).

В реальных условиях схема подключения представляет собой структуру, показанную на рис. 5.



Рис. 5. Подключение аппаратуры в реальных условиях

В результате испытаний была произведена запись 4 wav-файлов, которые соответствуют 4 каналам SDR-устройства [17] при усилении 70 дБ. Данные коэффициенты усиления были выбраны с целью компенсации ослабления в 30 дБ аттенуатором Mini Circuits 15542-30 дБ.

Один из недостатков проводимых испытаний – это отсутствие синхронизации между приемником и передатчиком, которая отвечает за одновременную запись сигнала с передачей. Данный момент приводит к опережению или запаздыванию записанного сигнала относительно переданного, что ведет к появлению линейного подъема или спада соответственно у ФЧХ канала.

Следующий шаг включал в себя анализ 4 wav-файлов в программе MATLAB согласно разработанному алгоритму. Алгоритм производился поочередно над каждым файлом. В результате данных испытаний были построены графики АЧХ, ФЧХ и ГВЗ для всех четырех каналов при усилении 70 дБ, исходя из данных, полученных после обработки файлов в программе MATLAB.

Графики, представленные на рис. 6, 7, соответствуют АЧХ и ФЧХ всех четырех каналов приемника

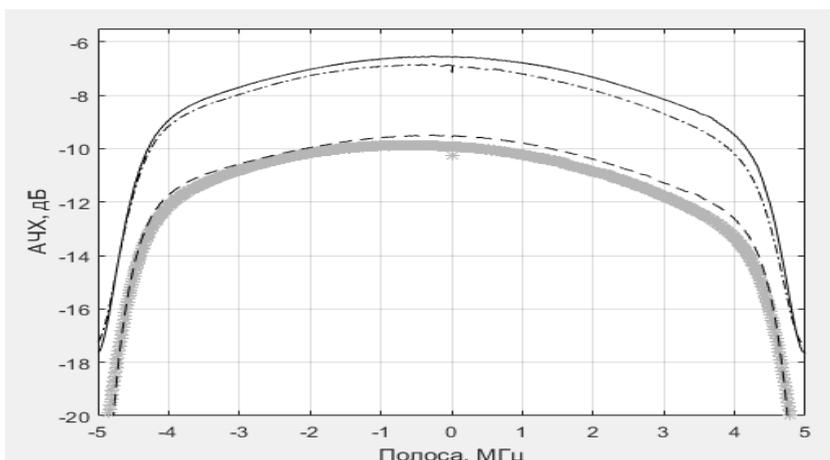


Рис. 6. Графики АЧХ, соответствующие четырем каналам четырехканального приемника

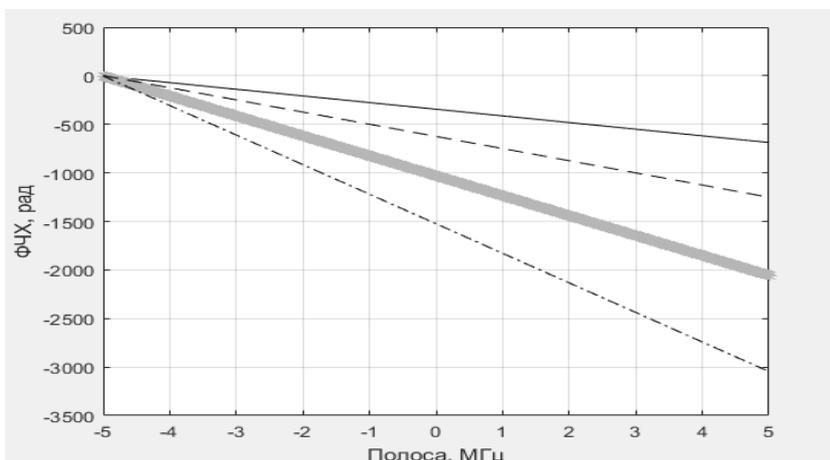


Рис. 7. Графики ФЧХ соответствующие четырем каналам четырехканального приемника

Маркеры, соответствующие каналам приемника, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Маркеры, соответствующие каналам приемника

| Канал  | 1                        | 2                | 3                                    | 4                        |
|--------|--------------------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Маркер | Сплошная тонкая<br>————— | Пунктир<br>----- | Пунктир с точками<br>- . - . - . - . | Сплошная жирная<br>————— |

Последним шагом стояла проверка параметра коэффициента усиления. Так как при изменении данного параметра изменению подвергнутся лишь АЧХ каналов, то следует рассматривать только данную характеристику на участках их равномерности. В результате построена табл. 2, в которой представлены значения АЧХ для разных параметров усиления для первого канала.

Таблица 1. Значения АЧХ в соответствии с коэффициентом усиления SDR-модуля для первого канала

| K <sub>ус.</sub><br>дБ | $\Delta f$ , МГц |       |       |      |      |      |       |       |       |
|------------------------|------------------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
|                        | -4               | -3    | -2    | -1   | 0    | 1    | 2     | 3     | 4     |
| 50                     | -30,3            | -29,1 | -28,1 | -28  | -28  | -28  | -28,6 | -29,5 | -30,8 |
| 60                     | -20,3            | -19,1 | -18,4 | -18  | -18  | -18  | -18,6 | -19,5 | -20,8 |
| 70                     | -8,9             | -7,7  | -7,1  | -6,6 | -6,5 | -6,7 | -7,3  | -8,1  | -9,5  |

Как видно, при изменении коэффициента усиления на 10 дБ значения АЧХ повышаются на те же 10 дБ для коэффициентов усиления 20 и 30 дБ, но для 40 дБ – на 11,5 дБ.

### Вывод

К основным результатам исследования относятся: разработанная методика проверочных испытаний стенда ЦАР для оценки технических характеристик приемных каналов SDR-модулей. Пользуясь данной методикой, проведены испытания стенда, реализующего цифровую антенную решетку. В результате данных испытаний были найдены АЧХ, ФЧХ приемных каналов четырехканального приемника. АЧХ каналов имеет ослабление на центральной частоте на 6,5 дБ на 1-м и 3-м канале и 10 дБ на 2-м и 4-м каналах относительно переданного сигнала с векторного генератора через эквивалент канала в 30 дБ при равномерности в 2-3 дБ в полосе  $\pm 4$  МГц от центральной частоты. ФЧХ приемных каналов четырехканального приемника не имеет значительных искажений и имеет равномерный линейный закон изменения, что наблюдается на графиках. Так как ФЧХ изменяется строго линейно, это подтверждает, что ГВЗ каналов является константой.

*Исследование выполнено в рамках проекта №11.04.02/18ХВВ.*

### Список литературы

1. Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. (г. Ижевск, 31 мая 2019 г.) / отв. ред. К. Ю. Петухов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2019. 480 с.
2. *Шинаков, Ю. С.* Пик-фактор сигналов OFDM и нелинейные искажения в радиооборудовании систем беспроводного доступа // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 4. С. 58–65.
3. *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.
4. *Васильев, Д. С.* Протоколы маршрутизации в MANET / Д. С. Васильев, А. В. Абилов // Электросвязь. 2014. № 11. С. 52–54.
5. *Ревило, О. А.* Алгоритмы оценки потерь пакетов с адаптацией по выборке для сетей передачи потоковых данных / О. А. Ревило, В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6, № 7. С. 161–164.
6. *Чунаев, А. В.* Алгоритм AL-ARQ для потоковой доставки видеоданных в беспроводной локальной сети / А. В. Чунаев, А. В. Абилов, М. М. Павлова // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13, № 1. С. 68–73.
7. *Емельянов, В. Н.* Применение адаптивных алгоритмов управления с использованием временного окна для передачи потоковых данных / В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6, № 7. С. 85–90.
8. *Ковалев, В. В.* Формирование и обработка OFDM-сигналов / В. В. Ковалев, О. Ю. Селецкая, Д. А. Покаместов // Молодой ученый. 2016. № 14. С. 151–154.
9. *Рухлин, С. Н.* Вопросы формирования и применения OFDM-сигналов в современных системах связи и телекоммуникаций // III Всероссийские Армавские чтения. Муром : Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2013. С. 201–208.
10. *Барбашин, Д. И.* Моделирование передней панели телекоммуникационных устройств / Д. И. Барбашин, А. И. Нистюк // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 163–165.
11. *Васильев, О. И.* Телекоммуникационные устройства с тактильной обратной связью / О. И. Васильев, О. С. Карпов, А. И. Нистюк // Приборостроение в XXI веке – 2014. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. С. 364–367.
12. *Нистюк, А. И.* Технология тактильных ощущений объема изображений на сенсорном экране // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 2. С. 120–122.
13. *Nistyuk, A.* Mathematical base of technology of tactile feedback in devices with the touch screen // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2013. Proceedings. 2013.

14. *Нистюк, А. И.* Программно-аппаратный комплекс для исследования сложных телекоммуникационных систем и систем управления // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1. С. 149–152.

15. *Дьяконов, В. П.* MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М. : СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.

16. *Васильев, А. С.* Основы программирования в среде Lab VIEW / А. С. Васильев, О. Ю. Лашманов. СПб. : Университет ИТМО, 2015. 100 с.

17. *Johnson R., Sethares W., Klein A.* Software Receiver Design: Build Your Own Digital Communication System in Five Steps // Cambridge University Press. 2011. 480 p.

*A. S. Raev*, master student

*Y. T. Zagidullin*, senior lecturer

*A. N. Kopysov*, CSc in engineering, assoc. prof., head of the chair  
“Radio engineering”

*V. V. Khvorenkov*, DSc, professor

E-mail: tema.raev2018@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Development of Methods and Estimation of Characteristics of SDR Modules Included in the Stand of the Digital Antenna Array**

*Article is devoted to the description of the stand for work with radar signals. The purpose of the article is to develop methods and testing for estimate the technical characteristics of the receiving channels SDR of the digital antenna array stand. Describes the main specifications receiving channels SDR.*

**Keywords:** SDR, digital antenna array, USRP X310, UBX-160, TwinRX-80, OFDM, Rohde&Schwarz SMU 200A, MATLAB, LabVIEW.

*This investigations was funded to the research project No. 11.04.02/18XBB.*

---

УДК 621.396

*А. С. Раев*, магистрант

*П. М. Касимов*, студент

*А. А. Зайцева*, студент

*А. Н. Копысов*, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Радиотехника»

E-mail: pavel\_kasimov5@list.ru

Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

### **Исследование и оценка характеристик сквозного тракта стенда, реализующего цифровую антенную решетку**

*Статья посвящена оценке технических характеристик сквозного тракта стенда, реализующего цифровую антенную решетку. Разработана методика и проведены испытания стенда, выполнена оценка технических характеристик сквозного тракта. В результате выявлено, что сигнал при прохождении по тракту приобрел ослабление на центральной частоте 12 дБ на всех восьми каналах относительно переданного сигнала.*

**Ключевые слова:** SDR, USRP X310, UBX-160, TwinRX-80, MATLAB, LabVIEW.

#### **Введение**

Бурное развитие цифровой техники привело к применению цифровых методов радиотехники. Одним из примеров является использование стендов с SDR-модулями в их составе. Современное стендовое оборудование с системой SDR и универсальными цифровыми платформами предоставляет потенциальное решение проблемы постоянно растущих требований к радиоаппаратуре. Переход от аналоговых систем к цифровым позволил увеличить объем информации об интересующих источниках сигналов и уменьшить влияние помех и шумов при передаче сигнала. Поэтому исследование характеристик стенда, реализующего цифровую антенную решетку (ЦАР), необходимо для определения их стабильности или при обратном выявлении их неравномерностей.

#### **Постановка цели и задач**

Стенд ЦАР для исследования ПМС представляет собой:

1. Антенную решетку: 1 передатчик (TX) x 4 приемника (RX).
2. Приемно-передающие модули (ППМ). В качестве ППМ применены SDR-приемо-передатчики модели USRP X310.

а) для формирования зондирующего сигнала применяется ППМ USRP X310 с дочерними платами UBX 160MHz;

б) для приема и преобразования отраженного сигнала применяется USRP X310 на 4 приемных каналах с дочерними платами TwinRX-80MHz.

3. Персональный компьютер (ПК). ПК необходим как для разработки и загрузки в ППМ алгоритмов излучения и приема сигналов, так и для сбора и обработки принятых данных.

Структура цифровой антенной решетки изображена на рис. 1.

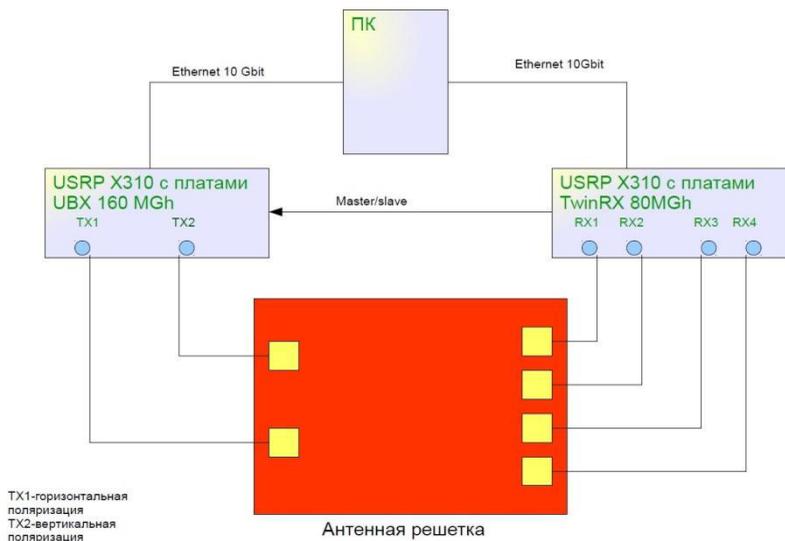


Рис. 1. Структура стенда ЦАР

Для корректной работы разработанного стенда ЦАР необходимо оценить его основные характеристики, а точнее характеристики ППМ данной системы.

**Цель данного исследования** состояла в проведении проверочных испытаний для оценки технических характеристик сквозного тракта стенда ЦАР.

В результате поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики проверочных испытаний стенда ЦАР для оценки технических характеристик сквозного тракта.

2. Проведение испытаний согласно методике для оценки технических характеристик сквозного тракта стенда ЦАР и оценка результатов.

### Теоретические сведения

В качестве основных технических характеристик сквозного тракта выступали амплитудно-частотная характеристика каналов (АЧХ), фазо-частотная характеристика каналов (ФЧХ) и групповое время запаздывания каналов (ГВЗ). Для того чтобы оценить данные характеристики, необходимо произвести прием широкополосного сигнала в заданной полосе частот и на основе принятых отсчетов построить графики выбранных характеристик. Одним из важнейших параметров, который должен иметь сигнал, является низкий пик-фактор [1].

Общедоступно, что сигналы с ЛЧМ обладают высокой энергетической эффективностью (пик-фактор порядка 3 дБ). Сигналы с OFDM [2] являются крайней противоположностью им, пик-фактор таких сигналов может достигать значений порядка единиц-десятков децибел.

При снижении пик-фактора с помощью методов минимизации сигнал с OFDM может быть рассмотрен в качестве зондирующего. Примером данных методов является формирование сигналов по алгоритму, описанному Ньюменом.

Суть представленного метода заключается в получении дискретной фазовой характеристики сигнала с OFDM путем аппроксимации исходного ЛЧМ-сигнала дискретными комплексными отсчетами в частотной области [3]. Фактически зондирующий сигнал формируется как сигнал с OFDM, однако, задав квадратичный закон распределения фазы каждого символа в соответствии с законом изменения фазы ЛЧМ-сигнала, полученный сигнал будет иметь вид ЛЧМ.

### Разработка методики проверочных испытаний стенда ЦАР для оценки технических характеристик ППМ

В рамках испытаний производился прием сформированного эталонного OFDM-сигнала с фазами Ньюмена от USRP X310 с платами UBX 160MHz в качестве передатчика к USRP X310 с платами TwinRX-80 в качестве приемника на частоте 1,5 ГГц, эквивалент канала связи 30 дБ.

Согласно данному алгоритму материально-техническое обеспечение испытаний включает в себя:

- USRP X310 2 шт.
- UBX 160MHz 2 шт.
- TwinRX-80 2 шт.
- аттенюатор Mini-Circuit 15542-30 дБ 1 шт.

Эталонный сигнал, представленный на рис. 2, имел основные параметры:

- количество поднесущих 1024.
- частота дискретизации, МГц 10.

- количество символов в пакете 1000.
- ширина полосы сигнала, МГц 10.
- уровень сигнала, В 1.

Временное представление сигналов, сформированных по методам Ньюмена и Шродера, изображено на рис. 2.

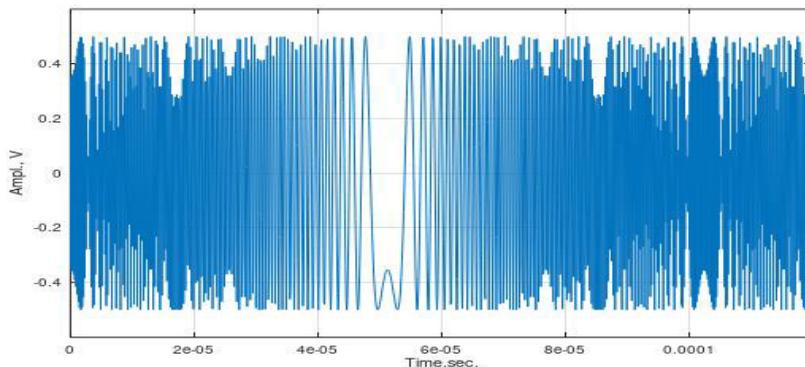


Рис. 2. Временное представление сигнала

Сигнал с этими параметрами формируется в программе MATLAB [4] и записывается в файл формата wav. Далее сформированный сигнал по оптическому каналу Ethernet 10 Gbit отправляется передающему устройству USRP X310 с платами UBX 160MHz. Передающее устройство излучает сигнал на несущей частоте 1,5 ГГц по коаксиальному кабелю через эквивалент канала 30 дБ на четырехканальный приемник USRP X310 с платами TwinRX-80, поочередно на каждый из четырех каналов. Средствами программы GnuRadio[5] устройство USRP X310 производит запись принятого сигнала через оптический канал Ethernet 10 Gbit в файл формата wav.

На рис. 3 представлен потоковый граф работы системы в программе GnuRadio.

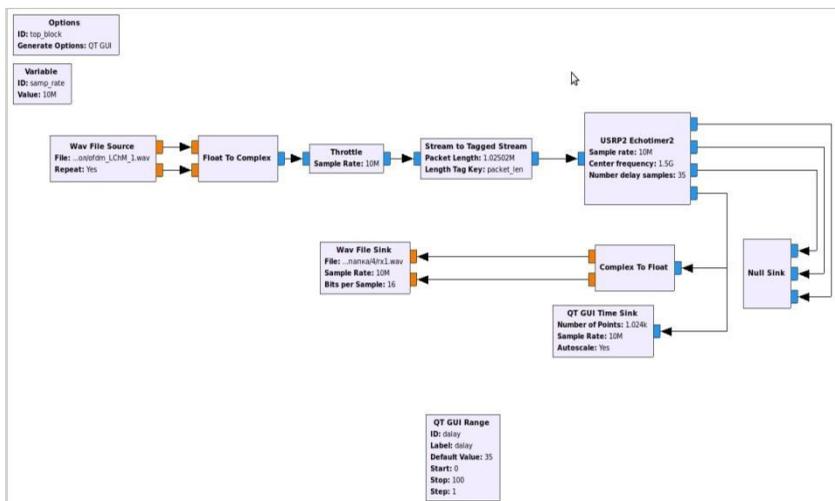


Рис. 3. Поточковый граф работы системы в программе GnuRadio

Синхронизация между устройствами проведена по принципу Master-slave («ведущий-ведомый»). Данный принцип представляет из себя модель взаимодействия в вычислительных комплексах, телекоммуникационных и информационных системах, в которой одно главное устройство (ведущее устройство) или процесс осуществляет однонаправленное управление подчиненным (ведомым) устройством или процессом или их группой. В данной системе за «ведущие» устройства отвечает приемник, а «ведомым» является передатчик. Основными синхронизирующими сигналами в системе являются сигналы опорного генератора и PPS TRIG-сигнал<sup>1</sup>.

Над файлом, в котором записан принятый сигнал, осуществляется алгоритм анализа, заложенный в программе MATLAB, и сравниваются характеристики эталонного и принятого файла. Алгоритм включает в себя выражения для нахождения передаточной характеристики, которая в свою очередь, включает в себя основные анализируемые характеристики: модуль передаточной характеристики – АЧХ, фаза передаточной характеристики – ФЧХ, первая производная ФЧХ по частоте – ГВЗ. Далее сравниваются все каналы приема между собой.

<sup>1</sup> Руководство пользователя USRP X300/X310 [Электронный ресурс]. URL: [https://sotemgroup.ru/uploads/files/USRP\\_X300,\\_X310](https://sotemgroup.ru/uploads/files/USRP_X300,_X310).

Согласно описанной методике построена блок-схема описанного алгоритма для оценки технических характеристик стенда, реализующего ЦАР. Данная блок-схема представлена на рис. 4.

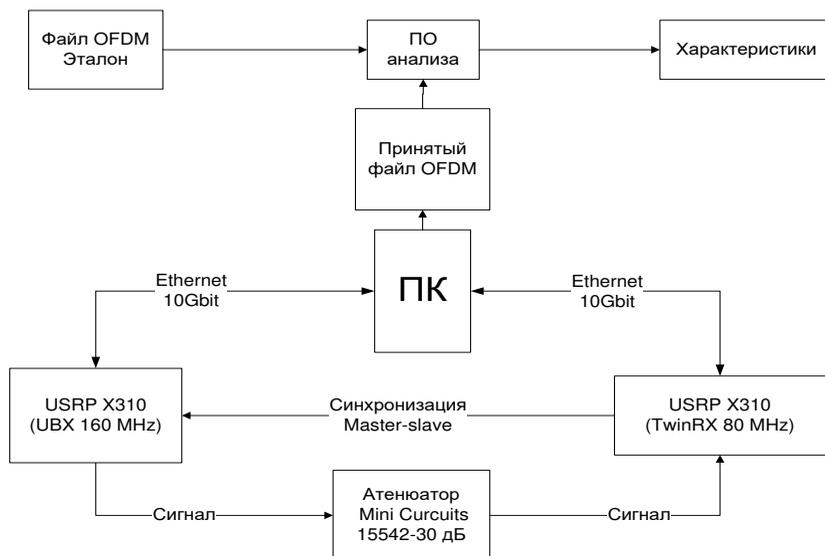


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оценки технических характеристик стенда, реализующего ЦАР

### Испытания стенда и их результаты

Испытания стенда, реализующего ЦАР, проводились согласно описанной методике в лабораторных условиях при нормальных значениях окружающей среды (температура, влажность, давление и т. д.).

Испытания проводились, используя блок-схему, представленную на рис. 4. В реальных условиях схема подключения представляет собой структуру, показанную на рис. 5.

В результате испытаний была произведена запись 8 wav-файлов, которые соответствуют четырем каналам SDR-устройства при трех различных параметрах усиления 70 дБ. Данные коэффициенты усиления были выбраны с целью компенсации ослабления в 40 дБ, выраженного аттенюатором Mini Curcuits 15542-30 дБ.



Рис. 5. Схема подключения ППМ USRP X310

Следующий шаг включал в себя анализ 8 wav-файлов в программе MATLAB согласно разработанному алгоритму. Алгоритм производился поочередно над каждым файлом. В результате данных испытаний были построены графики АЧХ, ФЧХ и ГВЗ для всех четырех каналов при усилении 40 дБ.

Данные графики представлены на рис. 6, 7.

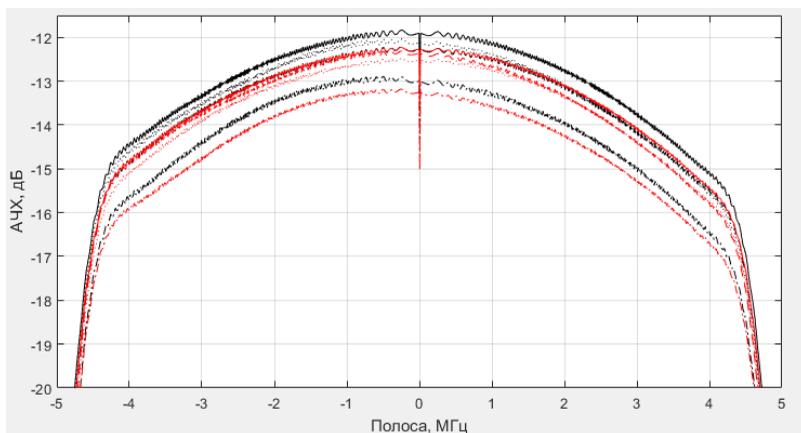


Рис. 6. Графики АЧХ, соответствующие сквозным каналам стенда

Проанализировав график АЧХ, представленный на рис. 6, можно заметить, что сигнал имеет ослабление на центральной частоте на 12 дБ на всех восьми каналах относительно переданного сигнала через эквивалент канала в 30 дБ при неравномерности в 2–3 дБ в полосе  $\pm 4$  МГц от центральной частоты.

|                    |    |    |    |                  |    |    |    |
|--------------------|----|----|----|------------------|----|----|----|
| --                 | -- | -- | -- | --               | -- | -- | -- |
| 1                  | 2  | 3  | 4  | 1                | 2  | 3  | 4  |
| Каналы горизонтали |    |    |    | Каналы вертикали |    |    |    |

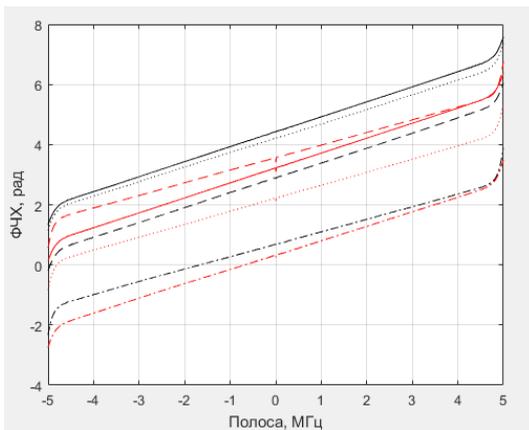


Рис. 7. Графики ФЧХ, соответствующие сквозным каналам стенда

На графиках ФЧХ видно, что сигнал имеет равномерную линейную характеристику в основной полосе частот. Линейный подъем характеристики обусловлен наличием задержки сигнала в каналах. Данную задержку можно оценить с помощью ГВЗ. Так как ГВЗ есть первая производная ФЧХ по частоте, значение будет выражено как тангенс угла к оси  $x$  графиков на рис. 7.

Например, для 1-го канала ГВЗ равно:

$$ГВЗ = \frac{(6-4) рад}{4 \cdot 10^6} = 0,5 \cdot 10^{-6} \approx 0.$$

Благодаря синхронизации наклон всех каналов идентичен, что видно на графиках. Согласно этому ГВЗ всех каналов одинаков.

### Выводы

В результате проведенных испытаний стенда, реализующего цифровую антенную решетку, были найдены АЧХ, ФЧХ, ГВЗ сквозных каналов стенда. Сигнал имеет ослабление на центральной частоте, на всех восьми каналах, относительно переданного сигнала. ФЧХ сквозных каналов стенда не имеют значительных искажений, что наблюдается на графиках. ГВЗ за счет синхронизации близко к нулю.

*Исследование выполнено в рамках проекта №11.04.01/18КАН.*

### Список литературы

1. Снижение пик-фактора многочастотных сигналов с неортогональным частотным уплотнением методом резервирования поднесущих частот / Нгюк Нуен Тан, Е. О. Антонов, Д. К. Фадеев, А. В. Рашич // Радиотехника. 2018. № 1. С. 16–23.
2. Технология OFDM : учеб. пособие для вузов / М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. М. Шлома, А. М. Шумов. М., 2017. 360 с.
3. Рухлин, С. Н. Вопросы формирования и применения OFDM сигналов в современных системах связи и телекоммуникаций [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/srsa-2013/pdf/S3\\_10.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2013/srsa-2013/pdf/S3_10.pdf), свободный (дата обращения: 05.06.2019).
4. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М. : ДМК-Пресс, 2007. 288 с.
5. Гумироф, Р. Ф. Конфигурирование SDR с помощью GNU Radio // Приборостроение в XXI веке. 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. 539–546.

A. S. Raev, master student

P. M. Kasimov, student

A. A. Zaytseva, student

A. N. Kopysov, CSc in engineering, assoc. prof., head of the "Radio Engineering" chair

E-mail: pavel\_kasimov5@list.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Research and Evaluation of Characteristics of Through Path of the Stand That Implements a Digital Antenna Array

*This article is devoted to assessing the technical characteristics of the through path of a stand that implements a digital antenna array. The technique was developed and the stand was tested, the technical characteristics of the through path were evaluated. As a result, it was revealed that the signal, while passing through the path, acquired attenuation at the center frequency of 12 dB on all eight channels relative to the transmitted signal.*

**Keywords:** SDR, USRP X310, UBX-160, TwinRX-80, MATLAB, LabVIEW.

*This investigations was funded to the research project No. 11.04.01/18KAH.*

УДК 004.932.72'1

*В. В. Ситников*, аспирант

E-mail: agron93@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

### **Постановка задачи проверки блоков индикации локомотивных с использованием машинного зрения**

*В статье приведена постановка задачи проверки функционирования блока индикации локомотивного, который применяется в локомотивных устройствах безопасности и служит для отображения машинисту служебной информации. Описывается основная визуальная информация, которая отображается на блоке индикации, и также приводится методика, с помощью которой будет осуществляться автоматизированная проверка функционирования блока индикации.*

**Ключевые слова:** блок индикации локомотивный, безопасность, машинное зрение, сверточная нейронная сеть, проверка функционирования.

#### **Введение**

Для нашей страны железнодорожный транспорт играет ключевую роль. Безопасность – одна из основных задач при организации пассажирских и грузоперевозок с помощью железных дорог. Любая транспортировка грузов и перевозка пассажиров предполагает риск возникновения аварийных ситуаций. Для снижения вероятности возникновения данных рисков в локомотивах применяются специальные системы для контроля и управления движением [1].

Значительный вклад в разработку систем безопасности локомотивных составов вносит предприятие ООО «ИРЗ-Локомотив». Предприятие выпускает комплексное локомотивное устройство безопасности (далее КЛУБ). Данное устройство предотвращает аварийные и предаварийные ситуации при движении поездов путем принудительного торможения и остановки поезда [2].

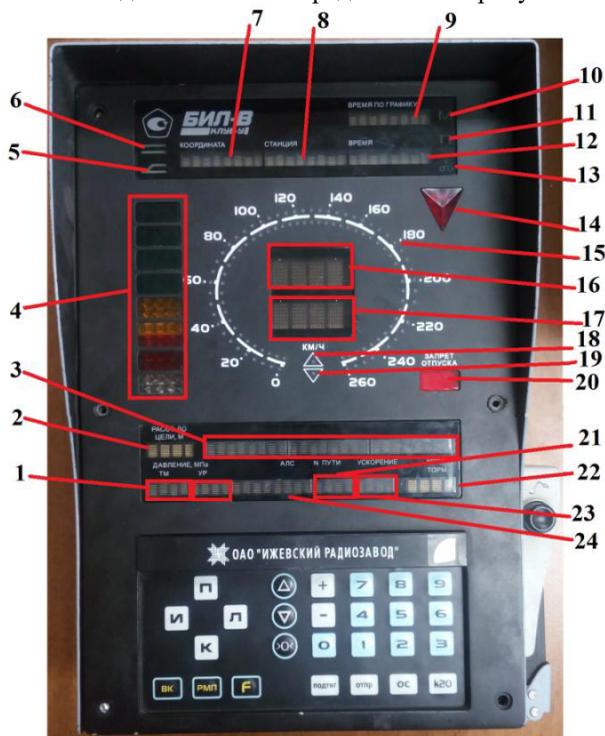
К выпускаемой продукции применяются жесткие требования к качеству и надежности. Перед тем как применяться в локомотивах, каждая система безопасности проходит множество проверок. Большинство проверок проводится в автоматизированном режиме, но присутствует ряд проверок, при которых необходимо присутствие регулировщика [3]. Например, регулировщик должен отслеживать информацию, которая отображается на индикаторах блока индикации локомотивного (далее БИЛ). В связи с этим на результат проверки может повлиять челове-

ский фактор. Для автоматизации проверки блоков БИЛ предполагается применение системы машинного зрения, с помощью которой можно анализировать информацию, отображаемую на блоке БИЛ.

### Описания информации, отображаемой на блоке БИЛ

Блок БИЛ представляет собой моноблочную конструкцию, размещаемую на пульте машиниста, и предназначен для отображения машинисту оперативной и служебной информации КЛУБ и системы автоматического управления торможением поездов.

Описание отображаемой информации рассмотрим на примере блока БИЛ-В. Внешний вид блока БИЛ-В представлен на рисунке.



Внешний вид блока БИЛ-В с выделенными индикаторами

Ниже представлена информация о том, какие данные и в каком виде отображаются на блоке БИЛ-В:

1 – индикация давления в транспортной магистрали (слева) и в уравнительном резервуаре (справа), цифровое значение;

2 – расстояние до ближайшей цели (в метрах), цифровое значение;

3 – информационная строка (например, отображение вводимой команды, яркость подсветки, вид цели и т. д.), информация отображается в текстовом виде;

4 – индикация сигналов светофоров – белый, красный, красно-желтый, желтый, четыре индикатора, отвечающих за зеленый сигнал (количество свободных блок-участков), информация отображается в виде цвета и положения индикаторов;

5 – прием локомотива на боковой путь, свечение индикатора;

6 – прием локомотива на прямой путь, свечение индикатора;

7 – железнодорожная координата, цифровая информация;

8 – наименование ближайшей станции по маршруту, текстовая информация;

9 – время прибытия по графику на ближайшую станцию, цифровое значение;

10 – индикация маневрового режима движения, свечение индикатора;

11 – индикация поездного режима движения (возможно отображение в мигающем режиме), свечение индикатора;

12 – отображение значения времени, цифровое значение;

13 – индикация состояния кассеты регистрации, свечение индикатора;

14 – знак «Внимание», мигание индикатора;

15 – аналоговое отображение допустимой скорости на верхней шкале (желтый цвет) и целевой скорости на нижней шкале (зеленый цвет), количество зажженных индикаторов;

16 – цифровое отображение фактической скорости, цифровое значение;

17 – цифровое отображение допустимой скорости, цифровое значение;

18, 19 – фактическое направление движения локомотива (вперед или назад), свечение индикатора;

20 – индикация запрета отпуска тормозов, свечение индикатора;

21 – отображение номера пути следования, текстовая информация;

22 – отображение коэффициента торможения, цифровое значение;

23 – отображение коэффициента ускорения, цифровое значение;

24 – отображение сигнала АЛС, текстовое значение.

Из описания отображаемой информации видно, что данные отображаются в разном виде. Присутствует информация, которая отображается как в виде цифр, так и в текстовом виде. Также имеются индикаторы, состояние которых необходимо отслеживать по их свечению либо по цвету, при этом у некоторых индикаторов присутствует мигающий режим включения.

### **Автоматизированный режим проверки блока БИЛ**

На данный момент проверка блоков БИЛ осуществляется при регулировании, приемо-сдаточных, периодических и типовых испытаниях. При проверках используется программа, с помощью которой происходит имитация работы системы безопасности. Тем самым можно выставить необходимые параметры и наблюдать их отображение на блоке БИЛ. Для проверки всего функционала в программе имитации можно задать файл сценария, с помощью которого поочередно будут заданы все возможные варианты отображения информации на блоке БИЛ. Данная программа позволяет производить проверку блоков индикации автономно, т. е. без использования дополнительных блоков систем индикации, а файлы сценария позволяют регулировщику не вводить вручную проверяемые параметры.

Главный недостаток данного типа проверок заключается в том, что регулировщику нужно самостоятельно отслеживать состояние индикаторов и сопоставлять их с теми, которые задаются на данный момент в файле сценария. При этом регулировщик должен одновременно отслеживать по инструкции значение параметров и сравнивать их со значениями, отображающимися на блоке индикации. Тем самым происходит большая задержка между переключением параметров индикации. С учетом того, что за одну проверку БИЛ необходимо отследить порядка 200 параметров, то время прохождения проверки – от 10 до 20 минут. Также значительным недостатком при нынешнем варианте проверок является то, что на итоговый результат проверки может повлиять человеческий фактор. В связи с необходимостью отслеживать визуальную информацию один регулировщик за один проход файла сценария может проверить лишь только один блок БИЛ, тем самым на проверку уходит большое количество времени.

Для исключения человеческого фактора при проверках блоков БИЛ планируется разработать систему машинного зрения. Под машинным зрением подразумевается технология автоматизации процесса обработки визуальной информации [4]. Система машинного зрения должна распознавать информацию, отображаемую на блоке БИЛ во время проведения проверок. Для реализации функции распознавания объектов будут применяться сверточные нейронные сети. Сверточные нейронные сети позволяют добиться частичной устойчивости к искажениям, например, смещению, изменению масштаба, смене ракурса [5]. Помимо распознавания в системе машинного зрения должен быть реализован алгоритм, который позволяет проводить анализ отображаемой информации. Анализ заключается в том, что информация, отображаемая на блоке БИЛ во время проверок, должна соответствовать информации, которая задается во время тестирования с помощью программы имитации. Так же должен производиться анализ работоспособ-

ности индикаторов, т. е. проверятся, вся ли информация отображается полностью и установлены ли индикаторы необходимого цвета. За счет высокого быстродействия система машинного зрения может произвести проверку по файлу сценария быстрее, чем регулировщик. Также возможно увеличение процесса прохождения проверок за счет того, что проверка может проводиться для нескольких блоков БИЛ одновременно.

Методика проверки блоков БИЛ при использовании системы машинного зрения будет сводиться к следующим действиям:

1) регулировщик собирает рабочее место, состоящее из проверяемых блоков БИЛ, источников питания для питания блоков индикации, блоков ввода и диагностики (далее БВД), которые будут использоваться для согласования передачи CAN-сообщений между блоком БИЛ и персональным компьютером, видеокамеры, расположенной перед лицевыми панелями блоков БИЛ и персональным компьютером с программным обеспечением для задания имитационных сообщений и проведения анализа правильности функционирования;

2) регулировщик запускает программное обеспечение для анализа работоспособности блоков;

3) с камеры изображение поступает на обработчик информации, и происходит определение типа блоков индикации, которые были установлены для проверки;

4) в автоматическом режиме подключается необходимый файл сценария для проверяемого типа блоков БИЛ;

5) происходит подача имитационных сообщений в том порядке, который заложен в файле сценария;

6) на блоках индикации переключается отображаемая информация;

7) параллельно с подачей имитационных сообщений работает анализатор информации, основанный на сверточной нейронной сети. С камеры передается изображение, и программное обеспечение анализирует, какая информация на данный момент отображается на блоке БИЛ;

8) происходит сравнение индикации, которая должна отображаться в соответствии с файлом сценария и с фактической информацией, отображаемой на блоках индикации;

9) по результатам проверки выдается отчет, в котором отображена информация о правильности функционирования. В случае неверного отображения информации в отчете указывается, какая индикация была отображена неверно.

Теоретическая значимость данной работы заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего расширения и углубления теоретических знаний об искусственных нейронных сетях, а также для изучения методов распознавания изображе-

ний. Практическая значимость разработки методов и алгоритмов компьютерного зрения для контроля функционирования технических систем заключается в возможности применения их для контроля функционирования систем безопасности локомотивов.

### **Выводы**

Внедрение системы машинного зрения позволит упростить процесс проведения проверок блоков индикации за счет исключения необходимости регулировщику следить за правильностью отображаемой информации на индикаторах. Исключение человеческого фактора позволит повысить качество выпускаемой продукции, снизить время на прохождение проверок, что приведет к снижению себестоимости продукции.

### **Список литературы**

1. *Ефименко, Ю. И.* Железные дороги. Общий курс : учебник. М. : Изд-во УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2017. 504 с.
2. *Баранова, Л. А.* Автоматизированные системы управления электроподвижным составом / Баранова Л. А., Савоськина А. Н. М. : Изд-во УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2016. 400 с.
3. *Давыдов, Н.* Оценка работоспособности локомотивных устройств безопасности // Евразия Вести. 2016. Вып. XII. С. 12.
4. *Дятлов Е.,И.* Машинное зрение (аналитический обзор) // Математические машины и системы. Киев, 2013. № 2. С. 32–40.
5. *Lollobert R., Weston J.* Uniflea Architecture tor Natural Language Processing: Deep Neural Networks with Multitask Learning // Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning. ICML '08. New York, NY, USA: ACM, 2008. Pp. 160-167.

*V. V. Sitnikov*, post-graduate student

E-mail: agron93@istu.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Statement of the Task of Checking the Locomotive Indication Blocks Using Machine Vision**

*This article presents the statement of task checking operation the locomotive indication unit, which is used in locomotive safety devices and serves display to the driver the service information. It describes the main visual information that is reflected on the display unit, and also provides a method by which automated testing of the display unit will be carried out.*

**Keywords:** locomotive indication unit, safety, machine vision, convolutional neural network, operation check.

УДК 531.383

*Ф. И. Спиридонов*, инженер-конструктор

E-mail: spiridonov.fedya@yandex.ru

*А. В. Кривов*, аспирант

*Р. И. Мингазов*, инженер-конструктор

*К. В. Шишаков*, канд. физ.-мат. наук, доц.

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Автоматическое определение осей жесткости резонатора твердотельного волнового гироскопа**

*В статье представлен анализ существующих методов и предложен альтернативный способ идентификации осей жесткости резонатора твердотельного волнового гироскопа. Рассмотрено влияние погрешностей резонатора на работу прибора, проведен анализ эксперимента по поиску осей жесткости, предложено использование комплексного способа определения осей жесткости при начальной стадии балансировки четвертой гармоники дефекта.*

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, балансировка, ось жесткости, разночастотность.

#### **Введение**

Разночастотность резонатора твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) влияет на систематический дрейф его выходного сигнала и характеризуется расщеплением собственной частоты резонатора на максимальную и минимальную [1]. Таким частотам соответствуют две резонансные оси, которые называются осями жесткости. Нахождение их углового положения является важной технологической операцией. Во-первых, они используются для уменьшения разночастотности в технологических операциях частотной балансировки резонатора по четвертой гармонике упруго-массового дефекта [2], во-вторых – для уменьшения влияния систематического дрейфа на выходной сигнал ТВГ в технологических операциях калибровки, когда они задают начало отсчета угловой функции «антидрейфа». При балансировке резонатора влияние разночастотности уменьшают за счет точечного удаления массы на поверхности резонатора в осях с максимальной жесткостью [3]. Поэтому качество балансировки во многом зависит от точности определения осей жесткости [4].

### Влияние разночастотности на волновые процессы ТВГ

В соответствии со свойствами резонансных осей ось максимальной жесткости будет ориентирована под углом в  $\pi/4$  к оси с минимальной жесткостью. При этом с использованием безразмерного времени  $\tau = \omega t$  уравнения свободных колебаний вдоль этих осей будут следующими [2]:

$$\begin{aligned}\ddot{C} + (1 + \Delta\omega)^2 C &= 0, \\ \ddot{S} + (1 - \Delta\omega)^2 S &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

где  $C, S$  – сигналы косинусного и синусного канала соответственно;  $2\Delta\omega$  – разночастотность сигналов.

В случае фазовой синхронизации они формируют рабочую стоячую волну, а их решение примет вид:

$$\begin{aligned}C(t) &= C_0 \cos(\omega t + \Delta\omega \cdot \omega t), \\ S(t) &= S_0 \sin(\omega t - \Delta\omega \cdot \omega t).\end{aligned}\quad (2)$$

где  $C_0, S_0$  – амплитуда сигналов в начальный момент времени;  $\omega$  – средняя частота колебаний резонатора.

Как видно из (2), в случае разночастотности сдвиг фазы между сигналами будет увеличиваться со временем:

$$\phi = 2\Delta\omega \cdot \omega t.\quad (3)$$

Угловое перемещение стоячей волны (по второй угловой форме колебаний) можно описать в виде элементов орбиты [5] следующим уравнением:

$$\begin{aligned}C(t, \theta) &= A \cos(\theta) \cos(\omega t + \tau) - B \sin(\theta) \sin(\omega t + \tau), \\ S(t, \theta) &= A \sin(\theta) \cos(\omega t + \tau) + B \cos(\theta) \sin(\omega t + \tau),\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\omega$  – резонансная частота второй формы колебаний резонатора;  $A$  – амплитуда основных колебаний;  $B$  – амплитуда квадратурных колебаний;  $\theta$  – угловая ориентация волны;  $\tau$  – временная фаза колебаний.

Съемные емкостные датчики располагаются под углом  $\pi/4$  относительно друг друга, а возбуждающий электрод – между ними. Тогда смещение оси жесткости относительно возбуждающего электрода будет породить расщепление частот сигналов на съемных датчиках [6].

При этом разночастотность резонатора ТВГ будет влиять на возникновение амплитуды квадратурных колебаний в (4) и рост фазовой составляющей в уравнениях (2).

Изменение фазового сдвига волны резонатора относительно ее угловой ориентации можно описать уравнением

$$\Psi(\alpha) = 2\pi \cos(4\alpha + \xi), \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угловая ориентация волны относительно возбуждающего электрода;  $\xi$  – смещение оси жесткости относительно возбуждающего электрода.

### Методы определения осей жесткости

Кратко рассмотрим особенности описанных в технической литературе [7] методов определения осей жесткости.

• *Метод определения осей жесткости по изменению фазового сдвига сигналов.* Методика определения осей жесткости по изменению фазовой картины относительно положения волны заключается в выполнении следующих двух основных этапов:

1) измерение значения набегания фазы в трех угловых положениях через угол  $\pi/16$ ;

2) определение положения оси жесткости относительно первого измерения.

Вычисления производятся по следующим формулам:

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{1}{4} \arctan \left( 1 + \sqrt{\frac{2\Delta F_1}{\Delta F_2 + o}} \right); (\Delta F_3 - \Delta F_2) > |\Delta F_2 - \Delta F_1| \\ \xi_1 = \frac{1}{4} \arctan \left( 1 - \sqrt{\frac{2\Delta F_1}{\Delta F_2 + o}} \right); (\Delta F_3 - \Delta F_2) \leq |\Delta F_2 - \Delta F_1| \end{cases}$$

$$v_\omega = \xi_1 - \frac{\pi}{16}$$

Здесь  $\{\Delta F_i; i=1..3\}$  – значения фазового смещения сигналов,  $v_\omega$  – значение оси жесткости относительно первого измерения;  $\xi_1$  – значение оси жесткости относительно второго измерения.

• *Вычисление фазового смещения сигналов: прямой метод.*

Вычисление величины фазового сдвига сигналов производится по формуле (3). При значениях разночастотности резонатора, превышающих 0,1 Гц, величину фазового сдвига аппаратно становится практически невозможно измерить в угловых положениях между осями жесткости. В процессе измерений происходит изменение волновой картины

резонатора. Амплитуда сигнала одного из датчиков стремится к нулю, что приводит к ошибкам в вычислении фазовой составляющей сигнала.

- *Вычисление фазового смещения сигналов: косвенный метод.*

Для вычисления фазового смещения волны было также предложено использовать косвенный метод. Он заключается в вычислении смещения фазы между сигналами через соотношения амплитуд исходных сигналов

$$\alpha_i = \frac{\min(Am_{ci}, Am_{si})}{\max(Am_{ci}, Am_{si})}$$

$$\Delta F_i = 2\pi \cos(4\alpha_i)$$

где  $\{Am_{ci}, Am_{si}, i = 1..3\}$  – амплитуды косинусного и синусного каналов,  $\alpha_i$  – угловая ориентация волны относительно возбуждающего электрода;  $i$  – номер измерения.

- *Метод определения осей жесткости по фазоугловой характеристике (ФУХ).*

Помимо вышеизложенных методов, существует метод определения осей жесткости и значения разностотности по фазоугловой характеристике (ФУХ). Метод определения осей жесткости состоит из двух этапов: 1) измерение фазовых сдвигов сигналов в угловых положениях 0 и  $\pi/16$  за время  $t$ ; 2) вычисление углового положения оси жесткости. При этом формула вычисления оси жесткости с использованием метода ФУХ имеет вид:

$$\nu_{\omega} = \frac{1}{4} \arctan \left( \frac{\int F_0 dt}{\int F_{\pi/8} dt} \right) + \frac{\pi}{8}$$

где  $F_0, F_{\pi/8}$  – фазовый сдвиг.

Кратко охарактеризуем чувствительность рассмотренных методов определения осей жесткости. Метод определения по ФУХ имеет высокую точность определения оси жесткости только при разностотности менее 0,01 Гц. В то же время метод, основывающийся на фазовом смещении сигналов, способен определять оси жесткости при разностотности более 0,01 Гц ; при этом нужно учитывать, что при разностотности более 0,1 Гц возникают сложности вычисления фазового смещения сигналов. Поэтому при разностотности более 0,1 Гц желательно использовать косвенный метод определения фазового смещения сигналов.

### Комплексный метод для автоматического определения осей жесткости резонатора ТВГ

Учитывая характеристику каждой из приведенных в предыдущем пункте методик, для практической реализации был предложен следующий алгоритм определения осей жесткости при различных значениях разночастотности, состоящий из трех этапов: 1) вычисление периода колебаний разности фаз; 2) вычисление приближенного значения разночастотности; 3) определение осей жесткости. При этом выбор методики идентификации осей жесткости производится автоматически из следующих ее вариантов: 1) при разночастотности более 0,1 Гц вычисление оси жесткости выполняется с использованием косвенного метода расчета фазового смещения сигналов; 2) при разночастотности 0,1 – 0,01 Гц для нахождения осей жесткости используется прямой метод нахождения фазового смещения сигналов; 3) при разночастотности менее 0,01 Гц определение оси жесткости производится по методу «ФУХ».

Описанный комплексный метод автоматического определения осей жесткости резонатора ТВГ был запрограммирован и отлажен для выполнения технологических операций по балансировке резонаторов.

### Полученные результаты

Вычислительный эксперимент производился на двух резонаторах. Полученные результаты вычисления оси жесткости приведены в нижеприведенной таблице.

#### Результат вычисления оси жесткости

| № | Выставленное угловое положение оси жесткости, град | Идентифицированное угловое положение для резонатора 1 (разночастотность 0,14 Гц) | Идентифицированное угловое положение для резонатора 2 (разночастотность 0,04 Гц) |
|---|--|--|--|
| 1 | 0  | -0,72  | 0,43   |
| 2 | 5,6  | 5,84   | 5,73   |
| 3 | 11,25  | 11,29  | 12,43  |
| 4 | 16,8   | 15,55  | 16,25  |
| 5 | 22,5   | 22,57  | 22,34  |

Видно, что отклонение вычисленных значений от выставленных не превышает 2 угловых градуса.

### Заключение

Таким образом, после проведения анализа известных методик определения осей жесткости было выявлено, что они имеют свои области преимущественного применения. Поэтому на их основе была предложена и

программно-аппаратно реализована комплексная методика поиска осей жесткости резонатора ТВГ при разных величинах разночастотности. Полученные контрольные результаты показали ее высокую эффективность.

### Список литературы

1. Лунин, Б. С. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография / Б. С. Лунин, В. А. Матвеев, М. А. Басараб. М. : Радиотехника, 2014. 176 с.
2. Жбанов, Ю. К. О балансировке волнового твердотельного гироскопа / Ю. К. Жбанов, В. Ф. Журавлев // Механика твердого тела. 1998. № 4. С. 4–16.
3. Левшонков, Н. В. Методы весовой балансировки ротора сверхлегкого вертолета с соосными винтами // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 2. Вып. 1. С. 5–7.
4. Кривов, А. В. Современное состояние проблемы балансировки резонаторов твердотельного волнового гироскопа / А. В. Кривов, И. В. Абрамов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. С. 195–200.
5. Журавлев, В. Ф. Двумерный осциллятор Ван дер Поля с внешним управлением // Нелинейная динамика. 2016. № 2. С. 211–222.
6. Определение параметров резонатора твердотельного волнового гироскопа и моделирование по экспериментальным данным / А. В. Кривов, Р. В. Мельников, Ф. И. Спиридонов, Г. А. Трутнев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2019. № 2. Вып. 1. С. 22.
7. Матвеев, В. А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа : учеб. пособие для втузов / В. А. Матвеев, В. И. Липатников, А. В. Алехин. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 168 с.

*F. I. Spiridonov*, design engineer

E-mail: spiridonov.fedya@yandex.ru

*A. V. Krivov*, postgraduate student

*R. I. Mingazov*, design engineer

*K. V. Shishakov*, CSc in physics and mathematics, associate professor

E-mail: shishakovkv@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### Automatic Detection of Stiffness Axes for a HRG Resonator

*The article presents an analysis of existing methods and proposes an alternative method for identifying the axes of rigidity of a solid-state wave gyroscope (TVG) resonator. The influence of the resonator errors on the operation of the device is considered, the analysis of the experiment to find the stiffness axes is carried out and the use of an alternative method for determining the stiffness axes is proposed, at the initial stage of balancing the fourth harmonic of the defect.*

**Keywords:** solid-state gyroscope, balancing, rigidity axes, different frequency

УДК 004.942

С. В. Стойчев, аспирант  
E-mail: stoichevsv@yandex.ru

В. Г. Гравшин, аспирант

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.

Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

### **Проверка возможности создания элемента с фрактальным импедансом на основе комплементарных RC-ЭПП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR**

*Рассмотрен подход анализа схемы, содержащей несколько RC-ЭПП со структурой слоев вида (R1+R2)-C-NR. Проведена проверка возможности создания ЭФИ на основе RC-ЭПП со структурой слоев данного вида. Полученные результаты показывают, что такая возможность существует, а созданные ЭФИ по своим характеристикам могут превосходить ЭФИ на основе RC-ЭПП со структурой слоев вида R-C-NR.*

**Ключевые слова:** элемент с фрактальным импедансом, R-C-NR-линия, конструкция элемента с фрактальным импедансом, толстопленочная технология, фазочастотная характеристика.

#### **Введение**

Элементом с фрактальным импедансом (ЭФИ) называют аналоговый пассивный элемент, имеющий дробно-степенную зависимость входного импеданса от частоты.

В общем виде выражение для фрактального импеданса (ФИ) можно записать в следующем виде:

$$\dot{Z}_F = (1/\omega^\alpha C_\alpha) e^{-j\alpha\pi/2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\alpha$  – дробный порядок ( $0 < \alpha < 1$ );  $C_\alpha$  – константа, имеющая смысл фрактальной емкости.

Характерной особенностью фазочастотной характеристики ФИ является постоянство фазового сдвига в ограниченном диапазоне частот, равных значению  $\varphi_C = -\alpha\pi/2$ .

В работах [1, 2] предложен и реализован способ создания ЭФИ на основе резистивно-емкостных элементов с распределенными параметрами (RC-ЭПП) со структурой слоев R-C-NR, основанный на синтезе

четырёхполюсного компонента и его схемы двухполюсного включения, содержащий до четырех одномерных однородных R-C-NR-линий, соединенных между собой определенным образом. Программа синтеза основана на вычислении целевой функции с использованием аналитических выражений коэффициентов матрицы  $y$ -параметров каждой R-C-NR-линии.

В работе [3] предложен резистивно-емкостной элемент с распределенными параметрами со структурой слоев (R1+R2)-C-NR (рис. 1). Данный компонент имеет шесть выводов подключения за счет разделения верхнего резистивного слоя на две части. Представляется, что увеличение числа конструктивных параметров (в частности, соотношение ширины резистивных полосок R1 и R2) позволит использовать это для улучшения его основных характеристик, а увеличение числа возможных вариантов схем двухполюсного включения позволит уменьшить количество требуемых элементов в схеме синтезируемого на этой основе ЭФИ.

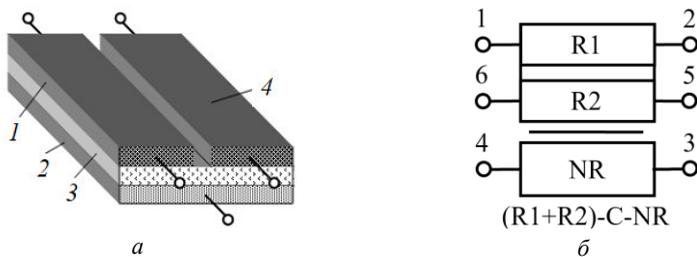


Рис. 1. RC-ЭПП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR: а – общий вид (1 – резистивный слой R1, 2 – резистивный слой NR, 3 – диэлектрик, 4 – резистивный слой R2); б – условно-графическое обозначение

Однако в отличие от четырехполюсного компонента, для новой шестиполюсной конструкции, распределение потенциалов в резистивных слоях которой имеет двумерный характер, не найдены аналитические выражения коэффициентов матрицы проводимости. В таком случае для анализа необходимо численное решение краевой задачи с использованием метода конечных распределенных элементов [4].

Эта математическая основа была заложена в программу анализа и синтеза двумерных RC-ЭПП RCWorkbench [5], одной из опций которой является вывод в файл коэффициентов неопределенной  $y$ -матрицы двумерного RC-ЭПП в зависимости от частоты при известной его топологии. Но программа RCWorkbench не позволяет анализировать схемы,

содержащие несколько соединенных между собой RC-ЭРП, что существенно ограничивает ее функциональные возможности.

Поэтому для проверки возможности создания ЭФИ на основе комбинации нескольких RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR предлагается подход, рассмотренный в данной статье.

### Решение задачи

Зададим в программе RCWorkbench топологию RC-ЭРП с указанной на рис. 1 структурой слоев и получим массив значений коэффициентов неопределенной матрицы  $u$ -параметров для требуемого диапазона частот в виде матрицы размером  $6 \times 6$ .

Исходя из количества используемых в анализируемой цепи RC-ЭРП (К) и полученных для них локальных матриц  $u$ -параметров формируем глобальную матрицу проводимости размером  $6K \times 6K$ , используя принцип анализа многополюсных подсхем [6].

Задав схему коммутации смежных RC-ЭРП и двухполюсную схему включения, получим матрицу инцидентий, которая отражает внутренние и внешние соединения исследуемого двухполюсника.

Численные значения входного импеданса двухполюсника получим, выполнив матричные преобразования глобальной матрицы проводимости с использованием матрицы инцидентий, описанные в работах [2, 6].

Поскольку требуется проверить возможность создания ЭФИ на основе комбинации нескольких RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR, то на основе полученных данных необходимо оценить характер ФЧХ импеданса двухполюсника и выполнение условия, вытекающего из выражения (1). Это требование выполняется, если ФЧХ импеданса имеет постоянную фазу  $\varphi_c$  в заданном диапазоне значений  $\lg(f_{\max} / f_{\min})$ , где  $(f_{\min} \dots f_{\max})$  – границы частотного диапазона.

Для автоматизированного поиска выполнения этого условия в какой-либо части ФЧХ был разработан следующий алгоритм. В произвольно выбранной точке  $(\varphi_i, f_i)$  на графике частотной характеристики выделяем условный коридор, ширина которого определяется допустимым отклонением  $\pm \Delta\varphi_c$ . Смещаясь вправо и влево по графику частотной характеристики от выбранной точки, определяем крайние точки, после которых значение уровня фазы выходит за пределы  $\pm \Delta\varphi_c$ . Значение частоты в левой ( $f_{\min}$ ) и правой ( $f_{\max}$ ) крайних точках будут определять границы частотного диапазона, на котором наблюдается постоянство фазы с допустимым отклонением. Пересечение коридора допусти-

мых значений уровня фазы с границами частотного диапазона  $\Delta f$  образуют окно, габариты которого можно сравнить с требуемым. Если габариты полученного окна равны или больше по ширине требуемого – результаты запоминаются, если нет – удаляются.

Такая процедура проводится для каждой точки графика частотной характеристики. В конечном итоге получим список окон. Наилучшим окном из данного списка является то, в котором разница между средним значением уровня фазы ( $\varphi_{\text{ср}}$ ) на диапазоне частот окна и во взятой точке

( $\varphi_i$ ) будет наименьшей.

Вариантов схем двухполюсного включения одного шестиполюсника довольно много [3], а т. к. наша задача заключается в задействовании нескольких RC-ЭРП, то добавляются варианты схем коммутации смежных элементов, и тогда их количество возрастет на несколько порядков. Поэтому необходимо автоматизировать процесс перебора и поиска схемы включения, отвечающей определенным требованиям, заданным пользователем.

Для организации автоматизированного перебора вариантов схем коммутации смежных RC-ЭРП и схем двухполюсного включения было создано:

- множество А, включающее в себя допустимые схемы коммутаций смежных RC-ЭРП;
- множество В, в которое включены допустимые схемы двухполюсного включения ЭФИ.

Также в процессе перебора некоторые узлы в схемах, соответствующих множеству А, могут быть заземлены, что дает дополнительные степени свободы при синтезе.

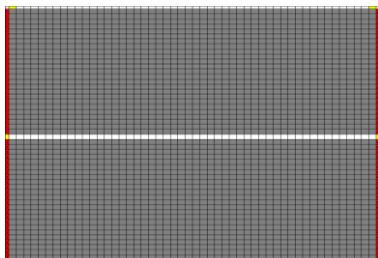
Чтобы отобрать только те варианты схем, у которых фазочастотная характеристика импеданса удовлетворяет критериям, заданным пользователем, используется этап оценки частотной характеристики, описанный ранее.

На основе вышеизложенного была разработана программа, которая реализует данный подход анализа двухмерных ЭФИ на основе нескольких RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR.

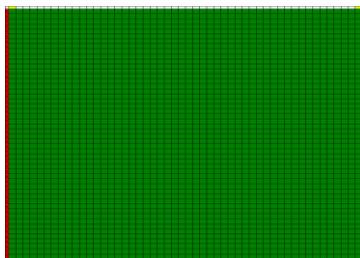
Рассмотрим применение предлагаемого подхода на конкретном примере. Для простоты предлагается использовать два RC-ЭРП с одинаковыми конструкциями и одинаковыми электрофизическими параметрами слоев. Созданная в программе RCWorkbench топологическая модель (R1+R2)-C-NR-ЭРП изображена на рис. 2, а параметры модели сведены в таблицу.

### Параметры модели (R1+R2)-C-NR-ЭПП

| Наименование параметра          | Значение |
|---------------------------------|----------|
| Удельное сопротивление, го      | 1        |
| Полная емкость структуры, С     | 1        |
| Количество ячеек по горизонтали | 50       |
| Количество ячеек по вертикали   | 50       |
| Коэффициент N                   | 0,218    |
| Пропорция частей                | 0,5      |



а



б

Рис. 2. Топологическая модель (R1+R2)-C-NR-ЭПП: а – топология верхнего слоя; б – топология нижнего слоя

Экспортированный из RCWorkbench массив значений коэффициентов неопределенной матрицы у-параметров RC-ЭПП для заданного диапазона частот (от 0,1 Гц до 10 кГц) импортируется в разработанную программу в виде текстового файла.

Для проверки работоспособности алгоритма количество коммутируемых RC-ЭПП было ограничено  $K = 2$ . Критерий выполнения условия (1) был задан следующими значениями:  $\pm \Delta \varphi_c = 3^\circ$ ,  $\lg(f_{\max} / f_{\min}) \geq 2$ .

Наилучший вариант схемы коммутации из списка полученных результатов программы представлен на рис. 3, а реализованная этим двухполюсником ФЧХ изображена на рис. 4

Данную ФЧХ можно охарактеризовать углом постоянства фазы  $41,2^\circ \pm 3^\circ$  в диапазоне от 0,5 до 400 Гц (2,9 декады). Поэтому в соответствии с принятыми критериями полученный двухполюсник,

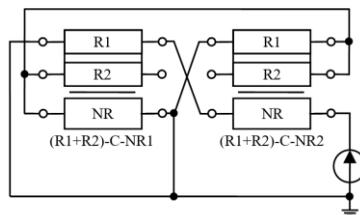


Рис. 3. Схема включения ЭФИ на основе комплементарных RC-ЭПП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR

образованный комбинацией двух RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR, обладает признаками ЭФИ.

Следует отметить, что в данном примере поиск схемы коммутации, реализующей условие (1), проводился при большом числе ограничений: число элементов два, одинаковые конструкции обоих элементов, фиксированное значение коэффициента  $N$ , отсутствие неоднородностей в резистивных слоях RC-ЭРП. Тем не менее, в сравнении с вариантом ЭФИ, полученным на основе двух RC-ЭРП со структурой слоев вида R-C-NR, описанным в [7], ЭФИ, полученный при этих ограничениях, имеет лучшие показатели:  $\pm\Delta\varphi_c = 2,5^\circ$ , в диапазоне частот 1,3 декады.

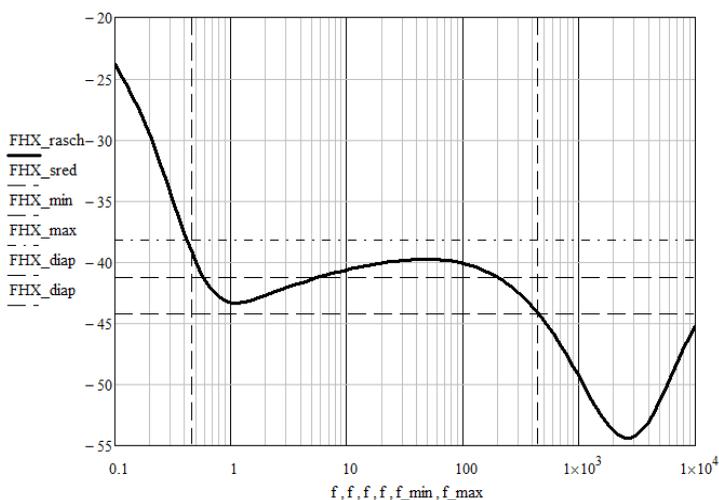


Рис. 4. Фазочастотная характеристика ЭФИ на основе комплементарных RC-ЭРП со структурой слоев (R1+R2)-C-NR

## Выводы

Предложен способ и алгоритм анализа схемы, содержащей несколько RC-ЭРП со структурой слоев вида (R1+R2)-C-NR, для которых можно получить  $u$ -параметры только в численном виде. На этой основе проведена проверка возможности создания ЭФИ, использующей комбинацию RC-ЭРП данного вида. Показано, что такая возможность существует, а созданные ЭФИ по своим характеристикам могут превосходить ЭФИ на основе комбинации RC-ЭРП со структурой слоев вида R-C-NR.

*Работа выполнена при поддержке гранта ИжГТУ №11.04.03/18УПА на тему «Разработка и исследование новых электронных компонентов для аналоговых процессоров, позволяющих моделировать динамические процессы, описываемые дифференциальными уравнениями дробного порядка».*

#### Список литературы

1. Ушаков, П. А. Разработка и обоснование структурной модели толстоплёночных R-C-NR-элементов с распределёнными параметрами / П. А. Ушаков, К. О. Максимов // Вестник ИжГТУ. 2011. № 2. С. 145–148.
2. Максимов, К. О. Решение задачи обеспечения заданных параметров фрактальных радиоэлементов на основе резистивно-емкостной среды : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск : ИжГТУ, 2013. 16 с.
3. Подсизерцев, М. А. Анализ характеристик шестиполосного R-C-NR-ЭРП при различных двухполюсных схемах включения / М. А. Подсизерцев, П. А. Ушаков. // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.) : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. С. 134–140.
4. Гильмутдинов, А. Х. Резистивно-емкостные элементы с распределёнными параметрами: Анализ, синтез и применение. Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. 350 с.
5. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2010612900. «Программа синтеза конструкции резистивно-емкостных элементов с распределёнными параметрами» / правообладатель : Филиппов А. В. ; авторы : Филиппов А. В., Ушаков П. А., Красноперов К. В. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 апр. 2010 г.
6. Филиппов, А. В. Структурно-параметрический синтез резистивноемкостных элементов с распределёнными параметрами со структурой слоев вида R-CG-NR : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Филиппов Андрей Владимирович. Ижевск: ИжГТУ, 2010. 18 с.
7. Ushakov, P.A. Research of fractal thick-film elements frequency responses / P. A. Ushakov, K. O Maksimov, A.V. Filippov // 11-th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices proceedings. Novosibirsk : NSTU, 2010. Pp. 165-167.

S. V. Stoichev, postgraduate student

E-mail: stoichevsv@yandex.ru

V. G. Gravshin, postgraduate student

P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **Verifying the Possibility of Creating an Element with Fractal Impedance Based on Complementary RC-EDP with the Structure of Layers (R1 + R2) -C-NR**

*The considered approach to the analysis of the circuit contains several RC-EDPs with the structure of the layers following type (R1 + R2) -C-NR. Also, was checked the possibility of creating EFI based on RC-EDP with this structure of layers. The obtained results show that such a possibility exists, and the created EFIs in their characteristics can exceed the EFI based on RC-EDP with the structure of the layers type R-C-NR.*

**Keywords:** element with fractal impedance, R-C-NR-line, element design with fractal impedance, thick-film technology, phase-frequency characteristic.

УДК 62-9

*Н. А. Фукалова*, магистрант  
*А. И. Нистюк*, д-р техн. наук, проф.  
*Л. И. Лихачева*, зав. лабораторией  
*С. Н. Рамазанова*, ст. преподаватель  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

**Установка для экспериментальных исследований  
тактильных ощущений изображения  
на средствах отображения информации  
телекоммуникационных устройств**

*Статья посвящена установке, с помощью которой проводится экспериментальное исследование, направленное на изучение тактильных ощущений, а именно ощущения объема изображения при прикосновении к экрану телекоммуникационного устройства, с целью определить наиболее подходящий демпфирующий материал для экрана телекоммуникационного устройства.*

**Ключевые слова:** установка для экспериментальных исследований, тактильные ощущения, акселерометр, динамический возбудитель, демпфер, упруговязкая прокладка.

**Введение**

В настоящее время тактильные экраны и ощущения, получаемые от них, являются неотъемлемой частью всех сфер деятельности человека. В частности, тактильные экраны нужны людям с ограниченными возможностями по зрению, диспетчерам авиапортов, военным.

Сейчас многие популярные устройства с сенсорным экраном удовлетворяют требованиям людей с ограниченными возможностями. Например, операционные системы от Apple – iOS и от Google – Android, каждый из которых предоставляет программное обеспечение для чтения с сенсорного экрана, которое позволит пользователям перемещаться по поверхности сенсорного экрана и с помощью сенсорного тактильного способа вводить и выводить информацию. Компания Tactile Layer ведет разработки по созданию деформируемого сенсорного экрана, на котором расположены рельефные узоры поверх обычных тачскринов, что делает экранные кнопки, стрелки, полосы прокрутки и прочие формы объемными [1]. Доступность обычного сенсорного экрана и интерфей-

сов, в частности iPhone, сделала их популярными среди многих пользователей. Но в таких сенсорных экранах есть некоторые недостатки:

– во-первых, эти программные решения, как правило, ограничиваются обеспечением акустической обратной связи и не могут обеспечить тактильную обратную связь, которая может быть более полезна для слабовидящих людей;

– во-вторых, основное программное обеспечение специальных возможностей для сенсорных экранов в основном направлены на обеспечение доступа для мобильных телефонов. Большие сенсорные экраны, такие как те, что на интерактивных площадках или сенсорных экранах киосков, могут представлять дополнительные проблемы взаимодействия. Так как крупные поверхности взаимодействия становятся все более распространенными, обеспечение доступности этих сенсорных экранов является приоритетной задачей.

Важным этапом в комплексе данных исследований, направленных на создание методики оценки качества процесса взаимодействия оператора с пользовательским интерфейсом, является эксперимент. Не менее важным для эффективного взаимодействия человека с дисплеем телекоммуникационного устройства с элементами тактильных ощущений является скорость его отклика от прикосновения к экрану. Это также связано со скоростью обработки информации телекоммуникационным устройством и скоростью передачи данных в сети беспроводной связи. Качество каналов таких сетей зависит от уровня потерь передаваемых данных, которые могут возникать вследствие затухания широкополосного сигнала, используемого в беспроводной сети, и влияния радиочастотных помех. Вопросы обеспечения качества передачи информации с помощью широкополосных сигналов на физическом уровне модели OSI рассматриваются в работах [2–5]. Кроме того, потери данных могут также происходить на сетевом, транспортном и прикладном уровнях вследствие перегрузки маршрутов доставки информации и нестабильной топологии самоорганизующихся сетей беспроводных телекоммуникационных устройств. Вопросы обеспечения качества передачи данных в самоорганизующихся сетях рассматриваются в работах [6–10].

Задача экспериментального исследования заключается в оценке влияния частоты вращения неуравновешенной массы на точность тактильного ощущения в зависимости от используемых в эксперименте материалов. Исходя из результатов проведения эксперимента и в дальнейшем создания сенсорного экрана, это позволит решить проблему доступности сенсорных экранов в любой сфере деятельности человека и, в частности, для людей с ограниченными возможностями.

### Описание эксперимента

Практически во всех устройствах для уменьшения амплитуд резонансных колебаний при воздействии вибраций на микроэлектронную вычислительную аппаратуру устанавливают специальные устройства – демпферы или демпфирующие материалы [11]. Для того чтобы исследовать тактильные ощущения на средствах отображения информации, необходимо узнать, как те или иные материалы ведут себя в ходе эксперимента, и сравнить полученные данные. Для проведения эксперимента использовался аппаратный комплекс, параметры которого соответствуют работе на средствах отображения информации телекоммуникационных устройств. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

В установку входят:

1. Блок питания Б5-43А, выходное напряжение: 0,01–9,99 В, ток нагрузки: 0–3 А, питание: (220±22) В, (50±0,5) Гц, потребляемая мощность: 110 В\*А (90 Вт). Стабилизация выходных напряжений и токов в приборе Б5-43А осуществляется линейным регулятором. Установка напряжения или тока в приборах Б5-43А осуществляется с передней панели двухоборотным потенциометром с высокой разрешающей способностью и контролируется встроенным цифровым вольтметром.

2. Осциллограф С1-112А имеет один канал, полосу пропускания сигнала 0–10 МГц. Измерение сигналов в режиме осциллографа в амплитудном диапазоне от 5 мВ до 250 В и во временном диапазоне от 0,12 мкс до 0,5 с. Перед экспериментом осциллограф был поверен измерительным прибором, имеющим класс точности выше поверяемого.

3. Акселерометр KD35 31003. Акселерометр пьезоэлектрический предназначен для использования с портативными и лабораторными устройствами измерения вибрации, адаптерами В65 и V65, а также измерителями уровня звука. Коэффициент передачи 5,05 мВ/мс<sup>-2</sup>, резонансная частота – 20 кГц. Емкость – 1 нФ, максимальное измеряемое ускорение KD35 – 3 мс<sup>-2</sup>, температурный диапазон – от –35 °С до +150 °С.

4. Динамический возбудитель колебаний QX-6А-3В. Является бесколлекторным с насадкой, напряжением 3 В, частота вращения, об/мин: 9000, максимальный ток потребления 0,085 А.

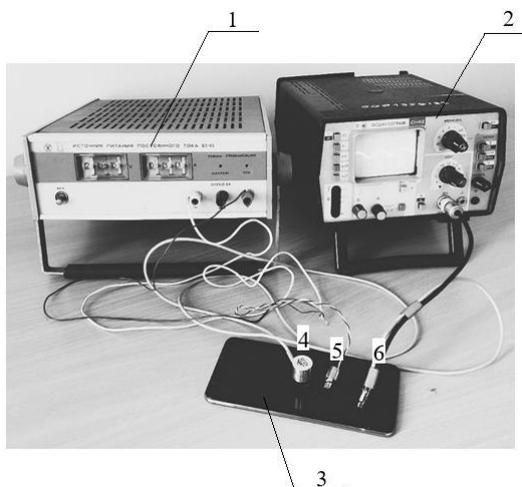


Рис. 1. Изображение экспериментальной установки: 1 – блок питания; 2 – осциллограф; 3 – экран смартфона; 4 – акселерометр; 5 – динамический возбудитель колебаний; 6 – контакт соединения осциллографа с акселерометром

Все элементы подключаются, как показано на рис. 1. На рис. 2 представлена система экспериментального устройства в целом.

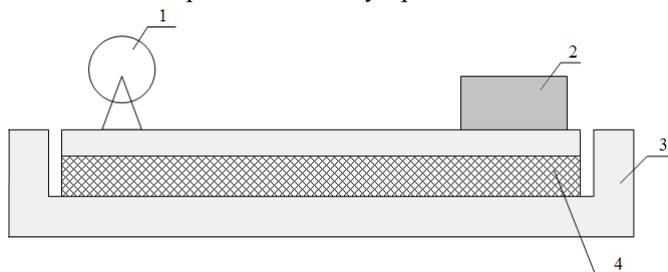


Рис.2. Система экспериментального устройства: 1 – динамический возбудитель; 2 – акселерометр; 3 – корпус; 4 – упруго-вязкая прокладка

Одним из основных элементов установки является вибромотор, который производит вибрации, характеризующиеся частотой, амплитудой. В общем случае конструкцию устройства можно представить в виде сложной колебательной системы, состоящей из множества простых колебательных систем, состоящих из груза с неуравновешенной массой  $m_1$ , основания массой  $m_2$ , пружины с жесткостью  $k$  и демпфера с динамическим коэффициентом  $\mu$  (рис. 3).

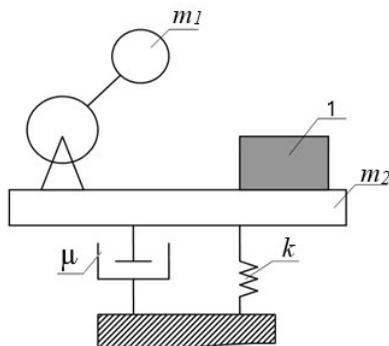


Рис. 3. Схема простой колебательной системы: 1 – акселерометр;  $m_1$  – неуравновешенная масса груза;  $m_2$  – масса основания;  $k$  – жесткость пружины,  $\mu$  – динамический коэффициент

Эксперимент осуществляется следующим образом: на устойчивую поверхность (корпус) устанавливается сменная упруго-вязкая прокладка, в данном эксперименте используются стекло в двух положениях (на поверхности и на опорах), пенополистирол. На прокладку ставится акселерометр таким образом, как показано на рис. 4, и динамический возбудитель колебаний на центре прокладки.

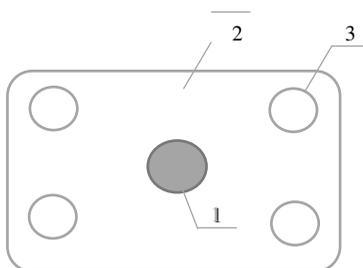


Рис. 4. Установка элементов на испытуемом материале: 1 – динамический возбудитель; 2 – материал; 3 – одно из возможных положений акселерометра

Сигнал, получаемый с акселерометра, выводится на экран осциллографа. С осциллографа снимаются данные сигнала, а именно его амплитуда для составления таблицы данных и получения соответствующего графика функций. В зависимости от используемого демпфирующего материала ожидаются графики функций, показывающие зависимость коэффициента передачи от частоты (рис. 5).

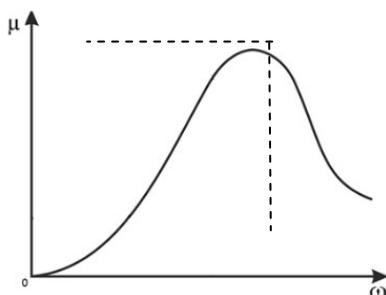


Рис. 5. График зависимости коэффициента передачи от частоты:  $\mu$  – динамический коэффициент;  $\omega$  – круговая частота вращения вибромотора

Прямая зависимость коэффициента передачи от частоты вращения вибромотора показывает, что при изменении данной частоты амплитуда колебаний может меняться [3].

Таким образом, в дальнейшем ожидается выяснить, как в зависимости от использования разных демпфирующих материалов передаются ощущения объема глубины изображения от частоты вращения неуравновешенной массы. И тем самым, сравнив полученные графики зависимости от каждого используемого в эксперименте материала, выбрать наиболее подходящий.

### Выводы

1. Экспериментальная установка реализует модель одномассовой динамической системы, обладающей одним выраженным резонансом.
2. В технической реализации устройств отображение информации не представляет затруднений, поскольку во множестве устройств типа смартфон мотор с неуравновешенной массой установлен, а изменение частоты вращения легко реализуется программным путем.
3. С помощью эксперимента выяснится, что при прикосновении к экрану телекоммуникационного устройства можно ощутить глубину объема изображения. Это приведет к созданию нового класса средств отображения информации.

### Список литературы

1. *Котов, П.* Tactile Layer: тактильная обратная связь для сенсорных дисплеев [Электронный ресурс] // 3DNews – Daily Digital Digest [Сайт]. URL: <https://3dnews.ru/630495> (дата обращения: 20.07.2019).

2. Методы синтеза составных частотно-временных сигналов / М. Л. Никитин, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, А. А. Богданов, А. В. Жидяев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. Т. 18, № 3. С. 93–97.
3. Синтез составного дискретно-частотного сигнала / А. Н. Копысов, И. З. Климов, Ю. Т. Загидуллин, В. А. Мошонкин, А. А. Богданов // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 95–98.
4. *Копысов, А. Н.* Измерительный стенд для записи сигналов с широкополосной несущей // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2006. № 1. С. 57–60.
5. *Бабинцев, Е. С.* Структурная скрытность дискретно-частотного и многочастотного широкополосных сигналов / Е. С. Бабинцев, А. Н. Копысов, И. З. Климов // Интеллектуальные системы в производстве. 2010. № 2 (16). С. 109–113.
6. *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.
7. *Васильев, Д. С.* Протоколы маршрутизации в MANET / Д. С. Васильев, А. В. Абилов // Электросвязь. 2014. № 11. С. 52–54.
8. *Ревило, О. А.* Алгоритмы оценки потерь пакетов с адаптацией по выборке для сетей передачи потоковых данных / О. А. Ревило, В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6, № 7. С. 161–164.
9. *Чунаев, А. В.* Алгоритм AL-ARQ для потоковой доставки видеоданных в беспроводной локальной сети / А. В. Чунаев, А. В. Абилов, М. М. Павлова // Инфокоммуникационные технологии. 2015. Т. 13, № 1. С. 68–73.
10. *Емельянов, В. Н.* Применение адаптивных алгоритмов управления с использованием временного окна для передачи потоковых данных / В. Н. Емельянов, А. В. Абилов // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6, № 7. С. 85–90.
11. *Нистюк, А. И.* Модели динамических систем накопителей информации // Приборостроение в XXI веке – 2011 : сб. материалов VII Всерос. науч.-техн. конф. (Ижевск, 15-17 ноября 2011 г.). Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. С. 362–366.
12. *Нистюк, А. И.* Технология обратной связи в устройствах с сенсорным экраном // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 3 (7). С. 66–68.

*N. A. Fukalova*, student

*A. I. Nistyuk*, DSc in engineering, professor

*L. I. Likhacheva*, head of laboratory

*S. N. Ramazanova*, senior lecturer

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

**Installation for Experimental Studies of Tactile Sensations of Images  
on the Means of Displaying Information of Telecommunication Devices**

---

*This article focuses on the installation, which is a pilot study aimed at examining tactile sensations, namely the sensation of the volume image when you touch the screen of the telecommunications device to determine the most suitable damping material for the screen of the telecommunications device.*

**Keywords:** installation for experimental studies, tactile sensations, accelerometer, dynamic pathogen, damper, elastically viscous laying.

## Секция 4. Физико-математические методы в приборостроении

УДК 517.95(045)

Т. Г. Возмищева, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ю. И. Рудина, студент

E-mail: tavo@mail.ru

Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

### **Исследование модифицированной модели войны или сражения на основе модели Лотки – Вольтерра, качественный и численный анализ**

*В работе исследованы модель Ричардсона гонки вооружения и модифицированная модель войны или сражения – модель Ланкастера – на основе модели Лотки – Вольтерра. Проведен качественный анализ, а также численный расчет эволюционных траекторий систем при различных параметрах. На основе построенных графиков решений проведен сравнительный анализ классической и модифицированной моделей.*

**Ключевые слова:** модель Лотки – Вольтерра, модель войны или сражения, модифицированная модель Ланкастера, модель Ричардсона гонки вооружения.

#### **Введение**

На протяжении всей истории человечества люди воевали. И в настоящее время происходят вооруженные конфликты как внутри отдельных стран, так и между странами. С чем это связано? Неизменно мыслители и исследователи пытались ответить на этот вопрос. В работе мы рассмотрим данное явление с точки зрения математики (не пытаясь ответить на этот вопрос с точки зрения философии), т. е. построив математическую модель на основе модели Лотки – Вольтерра [1, 2]. Данная тема весьма актуальна, поскольку дает возможность предопределить исход войны с точки зрения математики, безэмоциональной чистой науки, провести качественный и численный анализ. Аналитические и численные решения математической модели эволюции явления представляют значительный интерес во всех областях знаний [3].

В работе мы рассмотрим два случая:

1. Ситуация, в которой основная цель государства – собственная безопасность. В этом случае происходит так называемая «гонка вооружений», при этом основой является модель Ричардсона.

2. Ситуация, в которой целью государства является борьба за лидерство (осуществляется вызов действующему гегемону со стороны страны, которая не подчиняется его контролю). Такая борьба может привести к вооруженному конфликту, здесь мы воспользуемся модифицированной моделью Ланкастера.

### Модель Ричардсона «гонка вооружений»

Рассмотрим ситуацию, в которой могут оказаться две страны в состоянии конфронтации

$$\begin{cases} \dot{x} = ay - mx + r, \\ \dot{y} = bx - ny + s. \end{cases}$$

Каждая страна наращивает гонку вооружений ( $x$  и  $y$  – расходы на вооружение) в зависимости от реакции на вооруженность другой (коэффициенты  $a$  и  $b$ ), чем больше у государства военных расходов, тем сильнее недовольство населения ( $m$  и  $n$  накладывают ограничение на рост вооружений). Агрессивность (знак плюс) и миролюбивость (знак минус) описывают параметры  $r$  и  $s$ . Рассмотрим четыре случая комбинаций указанных параметров (табл. 1).

Таблица 1. Возможные комбинации параметров модели Ричардсона

|   |                 |         |         |
|---|-----------------|---------|---------|
| 1 | $(mn - ab) > 0$ | $r > 0$ | $s > 0$ |
| 2 | $(mn - ab) < 0$ | $r > 0$ | $s > 0$ |
| 3 | $(mn - ab) > 0$ | $r < 0$ | $s < 0$ |
| 4 | $(mn - ab) < 0$ | $r < 0$ | $s < 0$ |

*Случай 1.* Смоделируем ситуацию, в которой обе страны характеризуются «агрессивной» внешней политикой. С соотношением коэффициентов  $(mn - ab) > 0$ . В табл. 2 представлены значения параметров, при которых выполнялось моделирование  $(mn - ab) = 0,5$ .

Таблица 2. Начальные условия и значения коэффициентов для 1-го случая

| $a$ | $b$ | $m$ | $n$ | $r$ | $s$ | $x_0$ | $y_0$ |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 1   | 1,5 | 2   | 1   | 0,5 | 1   | 30    | 15    |

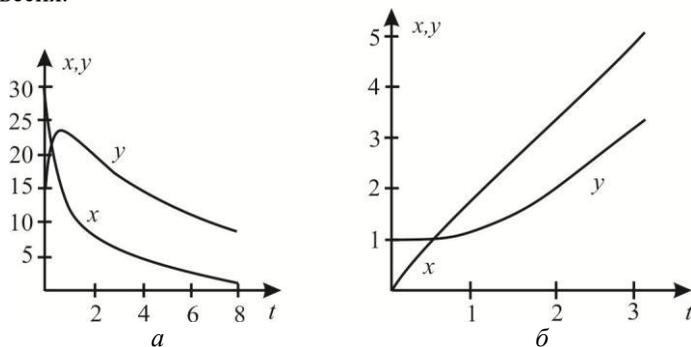
На рис. 1, *a* представлен график численного решения данной модели. На рисунке видно, что существует точка равновесия. Это обусловлено тем, что в начальный момент времени численность вооружения  $x$  значительно больше численности вооружения  $y$  (в два раза). Поэтому  $x$ , не видя для себя опасности, резко снижают численность вооружения ( $y$  – увеличивают). После момента достижения точки равновесия  $y$  продолжают наращивать вооружение еще какое-то время в целях своей безопасности. Это происходит недолго, т. к. вооружение  $x$  продолжает убывать. В результате у обеих стран наблюдается спад численности вооружения. Однако это не приводит к взаимному разоружению. Ситуация лишь становится стабильной и не приводит к вооруженному конфликту.

*Случай 2.* Рассмотрим также «агрессивную» внешнюю политику, но с соотношением коэффициентов  $(mn - ab) < 0$ . В табл. 3 представлены значения параметров, при которых выполнялось моделирование  $(mn - ab) = 0,5$ .

**Таблица 3. Начальные условия и значения коэффициентов для 2-го случая**

| $a$ | $b$ | $m$ | $n$ | $r$ | $s$ | $x_0$ | $y_0$ |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 2   | 1   | 1   | 1,5 | 1   | 1   | 0     | 1     |

Из рис. 1, *б* видно, что при данном соотношении коэффициентов гонка вооружений приводит к военному конфликту, несмотря на точку равновесия.



*Рис. 1.* Численное решение модели Ричардсона (случай 1 и случай 2)

*Случай 3.* Ситуация, когда обе страны проявляют «миролюбивость» во внешней политике и выполнено соотношение  $(mn - ab) > 0$  ( $(mn - ab) = 0,5$ , см. табл. 4).

Таблица 4. Начальные условия и значения коэффициентов для 3-го случая

| $a$ | $b$ | $m$ | $n$ | $r$  | $s$ | $x_0$ | $y_0$ |
|-----|-----|-----|-----|------|-----|-------|-------|
| 1   | 1,5 | 2   | 1   | -0,5 | -1  | 30    | 15    |

Ситуация похожа на случай 1, разобранный выше. Разница состоит в том, что при отрицательных коэффициентах  $r$  и  $s$  гарантированно произойдет разоружение обеих стран в зависимости от начальных условий.

*Случай 4.* Рассмотрим теперь ситуацию, когда страны миролюбивы и выполнено соотношение  $(mn - ab) < 0$  ( $(mn - ab) = -0,5$ , табл. 5).

Таблица 5. Начальные условия и значения коэффициентов для 4-го случая

| $a$ | $b$ | $m$ | $n$ | $r$  | $s$ | $x_0$ | $y_0$ |
|-----|-----|-----|-----|------|-----|-------|-------|
| 2   | 1   | 1   | 1,5 | -0,5 | -1  | 6     | 6     |
| 2   | 1   | 1   | 1,5 | -0,5 | -1  | 2     | 4     |

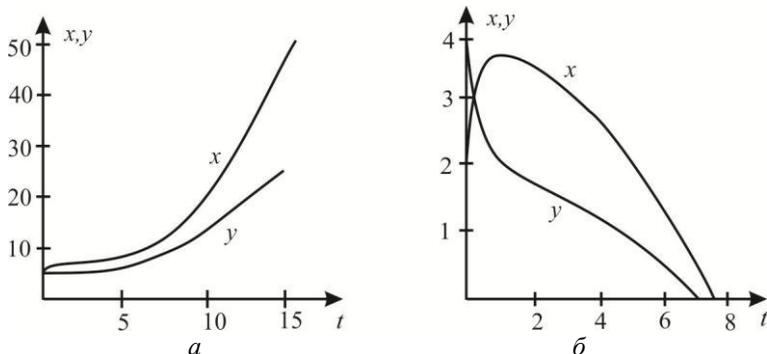


Рис. 2. Численное решение модели Ричардсона (случай 4)

Результаты вычислений показаны на рис. 2, *a* и *б*. Моделирование показало, что исход гонки вооружений при выбранной комбинации коэффициентов (см. табл. 5) существенно зависит от начальных условий. На рис. 2, *a* изображен случай, в котором указаны равные начальные условия у обеих стран. Это привело к бесконечной гонке вооружений, которая может закончиться войной. На рис. 2, *б* представлена ситуация, в которой начальные условия различны, остальные параметры прежние. Такие начальные условия привели к взаимному разоружению стран. Таким образом, наличие у стран «дружелюбной» внешней политики не гарантирует удовлетворительного исхода гонки вооружений, все зависит от заданных начальных условий.

### Анализ модифицированной модели Ланкастера

Модель Ланкастера представляет собой простейшую модель борьбы двух противников:

$$\begin{cases} \dot{x} = -by, \\ \dot{y} = -ax. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $a$  – мощность оружия армии  $x$ , а  $b$  – армии  $y$ . Каждый солдат армии  $x$  убивает за единицу времени  $a$  солдат армии  $y$  и, соответственно, каждый солдат армии  $y$  убивает  $b$  солдат армии  $x$ .

Как писал известный математик академик РАН В. И. Арнольд, эта «людоедская модель сильно идеализирована, и было бы опасно прямо применять ее к реальной ситуации». Поэтому необходимо модифицировать данную модель. Можно зашить усложнение системы в функциональную зависимость коэффициентов  $a$  и  $b$  [4], но можно также добавить в правые части уравнений системы (1) слагаемые, которые явно позволяют понять влияние отдельных компонент на исход войны или сражения. В данной работе мы рассмотрим влияние двух слагаемых: первое слагаемое учитывает одновременную гибель солдат двух армий (например, появилось ядерное оружие, которое может повлиять на обе стороны военного конфликта); второе слагаемое определяет влияние армий союзников на ход сражения:

$$\begin{cases} \dot{x} = -by - \beta xy + c, \\ \dot{y} = -ax - \phi xy + e. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $-\beta xy$  и  $-\phi xy$  в системе (2) задают одновременную гибель солдат, например, при артиллерийских обстрелах. Параметры  $c$  и  $e$  задают влияние армий союзников на ход и результат сражения. Естественно, что предельные модели возникают при отсутствии союзников: в случае, когда параметры  $c$  и  $e$  равны нулю, мы получим классическую модель Лотки – Вольтерра; когда  $\beta$  и  $\phi$  равны нулю, мы получим классическую модель Ланкастера. Значения параметров  $\beta$  и  $\phi$  зависят от мощности оружия собственной армии, т. е. от  $a$  и  $b$ . Чем больше параметр  $a$ , тем больше значение  $\beta$ . Это связано с тем, что чем мощнее оружие армии, тем больше вероятность гибели своих солдат при атаке противника (аналогично, чем больше  $b$ , тем больше значение  $\phi$ ). В данной работе будем полагать, что зависимость коэффициентов – линейная. Рассмотрим два случая соотношения коэффициентов (табл. 6). В первом случае численность обеих армий в начальный момент равна; преимуще-

ство армии  $y$  – количество союзников в два раза больше; преимущество армии  $x$  – мощность оружия больше в два раза.

Таблица 6. Начальные условия и значения коэффициентов для 1-го случая

| $x_0$ | $y_0$ | $a$ | $b$ | $\beta$ | $\phi$ | $c$ | $e$ |
|-------|-------|-----|-----|---------|--------|-----|-----|
| 15    | 15    | 0,6 | 0,3 | 0,012   | 0,006  | 0,1 | 0,2 |

Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из рис. 3, *a* видно, что побеждает армия  $x$ , это связано с тем, что при одинаковых начальных условиях важную роль играет мощность оружия. Что касается армий союзников, в данном соотношении параметров влияние союзников на ход сражения незначительно. Для того чтобы выиграть, армии  $y$  потребуется увеличить численность союзников в 15 раз, т. е. чтобы параметр  $e$  равнялся трем (рис. 3, *б*).

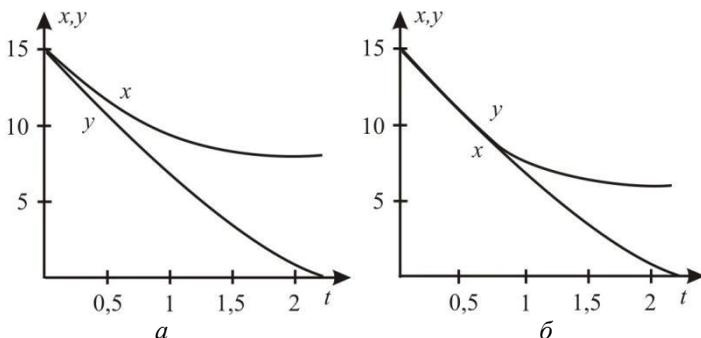


Рис. 3. Численное решение модифицированной модели Ланкастера (численность обеих армий в начальный момент равна)

Во втором случае учитываем численное превосходство армии  $y$  над армией  $x$  в два раза (табл. 7). Результаты вычислений представлены на рис. 4, *a*.

Таблица 7. Используемые параметры для 2-го случая

| $x_0$ | $y_0$ | $a$ | $b$ | $\beta$ | $\phi$ | $c$ | $e$ |
|-------|-------|-----|-----|---------|--------|-----|-----|
| 4     | 8     | 0,6 | 0,3 | 0,012   | 0,006  | 0,1 | 0,2 |

Видно, что победу одерживает армия  $y$ . Это объясняется тем, что мощности оружия армии  $x$  (в 2 раза больше) не достаточно, чтобы противостоять армии, численно превосходящей в два раза.

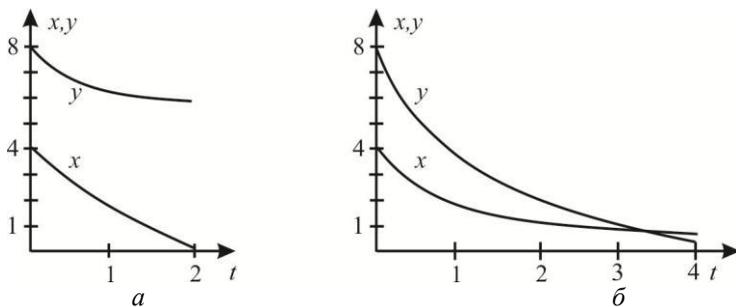


Рис. 4. Численное решение модифицированной модели Ланкастера ( $a = 1,5$ )

Чтобы одержать победу над таким противником, армии  $x$  требуется увеличить мощность оружия в 2,5 раз, т. е.  $a = 1,5$ . Результаты моделирования с теми же параметрами (табл. 7), но с другим значением  $a$  показаны на рис. 4, б. Из графика видно, как буквально в последний момент кардинально поменялся ход сражения, хотя потери велики – армия  $y$  уничтожена. Однако если численность союзников армии  $y$  увеличится на 0,041, т. е. если  $e = 0,241$ , то солдаты армии  $x$  потерпят поражение. Параметры, использованные в данной модели, указаны в табл. 8. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

Таблица 8. Используемые параметры

| $x_0$ | $y_0$ | $a$ | $b$ | $\beta$ | $\phi$ | $c$ | $e$   |
|-------|-------|-----|-----|---------|--------|-----|-------|
| 4     | 8     | 1,5 | 0,3 | 0,03    | 0,006  | 0,1 | 0,241 |

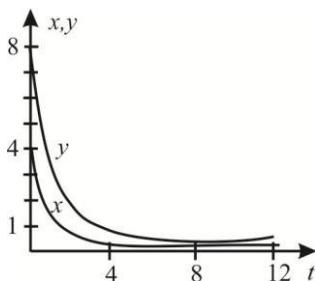


Рис. 5. Численное решение модифицированной модели Ланкастера (численность союзников увеличена)

### Сравнение результатов классической и модифицированной модели Ланкастера

Проведем сравнительный анализ классической и модифицированной модели Ланкастера при одинаковых начальных условиях и равных значениях  $a$  и  $b$  (табл. 9).

Таблица 9. Используемые параметры

| Модель           | $x_0$ | $y_0$ | $a$ | $b$ | $\beta$ | $\phi$ | $c$ | $e$ |
|------------------|-------|-------|-----|-----|---------|--------|-----|-----|
| Классическая     | 4     | 8     | 1,5 | 0,3 |         |        |     |     |
| Модифицированная | 4     | 8     | 1,5 | 0,3 | 0,03    | 0,006  | 0,1 | 0,2 |

Результаты вычислений для классической модели представлены на рис. 6 (классическая и модифицированная модели Ланкастера). Видно, что при заданных значениях параметров в обоих случаях (рис. 6) побеждает армия  $x$ , но во втором случае требуется более длительное время. Это обусловлено тем, что значения  $c$  и  $e$  малы. В случае с большими значениями коэффициентов результат был бы иным (как во втором случае, разобранным в предыдущем разделе).

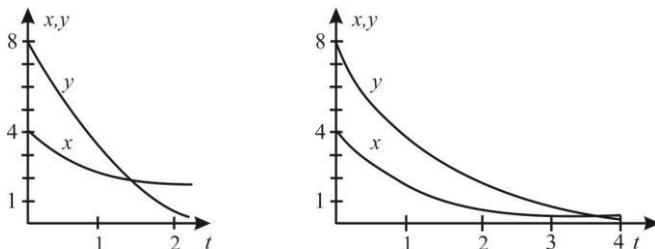


Рис. 6. Численное решение классической и модифицированной модели Ланкастера

Что касается классической модели Ланкастера, если при задании значений коэффициентов  $a$  и  $b$  (мощность оружия) учесть влияние армий союзников, включив его в значение мощности оружия, то результаты будут те же, что и в модифицированной модели. Параметры, при которых было выполнено моделирование, указаны в табл. 10.

Таблица 10. Используемые параметры

| Модель       | $x_0$ | $y_0$ | $a$ | $b$  |
|--------------|-------|-------|-----|------|
| Классическая | 4     | 8     | 1,5 | 0,37 |

Таким образом, модифицированная модель Ланкастера за счет вычленения влияния союзников, мощности оружия более точно прогнозирует

эволюцию системы. Полученные численные результаты с различными параметрами и дополнительными слагаемыми, их графическое представление дают возможность проводить сравнительный анализ различных моделей.

### **Выводы**

Модель Ричардсона показывает, как важны ограничения на гонку вооружения и «миролюбивость» внешней политики стран для того, чтобы избежать начала войны. Модель Ланкастера имеет несомненные достоинства по сравнению с классической моделью в отношении точности описания исследуемой системы (войны или сражения) и приближения модели к реальности. В модифицированной модели Ланкастера присутствуют слагаемые, отсутствующие в классической модели, что приводит к появлению новых закономерностей.

### **Список литературы**

1. *Вольтерра, В.* Математическая теория борьбы за существование. М. : Наука, 1976. 286 с.
2. *Базыкин, А. Д.* Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М. ; Ижевск : Ин-т компьютер. исследований, 2003. 368 с.
3. *Возмищева, Т. Г.* Траекторная эквивалентность задачи двух центров в плоском пространстве, в пространстве Лобачевского и на сфере: предельный переход (часть 1) // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. Т. 18, № 2. С. 112–116.
4. *Арнольд, В. И.* «Жесткие» и «мягкие» математические модели. М. : МЦНМО, 2004. 32 с.

*T. G. Vozmishcheva*, CSc in phys. and math., associate professor

*Yu. I. Rudina*, student

E-mail: tavo@mail.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

### **The Study of the Modified Model of War or Battle on the Base of the Lotka – Volterra Model, the Qualitative and Numerical Analysis**

*The modified model of war and battle – the Lanchester model – on the base of the Lotka – Volterra is studied in the work. The qualitative analysis and also the numerical calculation of evolutionary trajectories of system are carried out at various parameters. On the base of the built graphics of solutions the comparative analysis of the classical and modified model is carried out.*

**Keywords:** the Lotka – Volterra model, war or battle model, Lanchester model, Richardson arms race model.

---

УДК 531:519.6

С. В. Клишин, канд. физ.-мат. наук, доц.

А. И. Шаронов, магистрант

E-mail: serklishin@yandex.ru

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

### **Имитационная модель комплексной балансировки резонатора твердотельного волнового гироскопа**

*В статье рассмотрена методика идентификации дефекта масс резонатора твердотельного волнового гироскопа по первым четырем гармоникам. Создана имитационная модель комплексной балансировки резонатора для оценки методики. Построен алгоритм для этой модели.*

**Ключевые слова:** твердотельный, волновой, гироскоп, резонатор, имитационная модель.

#### **Введение**

Определение ориентации различного типа подвижных объектов (подземных, подводных, надводных, наземных, воздушных, околоземных и космических) осуществляется с применением гироскопических систем [1].

Повышение точности гироскопов является одной из важнейших задач. Существуют различные способы решения этой задачи. Одним из способов повышения точности твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) является уточнение модели съема и обработки информации [2]. Другой способ заключается в повышении точности исполнения конструктивных элементов ТВГ. Важным элементом ТВГ является резонатор из кварцевого стекла (рис. 1). Для того чтобы стоячая волна, возбуждаемая в резонаторе, обладала осевой симметрией, распределение массы кварцевого стекла также должно обладать осевой симметрией. Другими словами, центробежный момент инерции резонатора относительно оси симметрии должен быть равен нулю (на практике должен быть близок к нулю). Достижение такого распределения массы называется балансировкой резонатора [3]. Балансировка резонатора минимизирует расщепление собственных частот при основной форме колебаний и минимизирует силы реакций в опорах. Настоящая работа представляет собой развитие методики, представленной в статье [3].

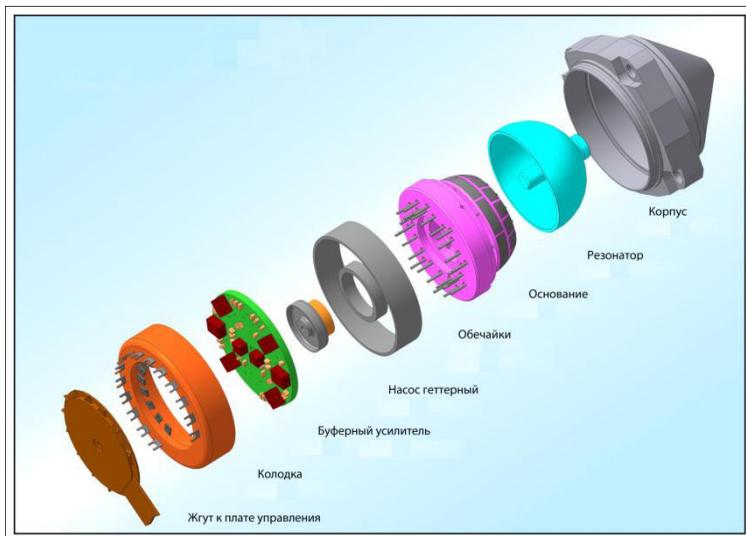


Рис. 1. Конструктивные элементы ТВГ

### Методика определения углового положения избыточной массы

Дефект масс резонатора описывается функцией плотности  $\rho(\phi)$ , которая при разложении в ряд Фурье принимает вид [4]

$$\rho(\phi) = \rho_0 \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_k \cos k(\phi - \phi_k) \right], \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – средняя плотность;  $\varepsilon_k$  – относительное отклонение плотности для  $k$ -й гармоники;  $\phi_k$  – ориентация  $k$ -й гармоники относительно некоторой оси;  $\phi$  – угловая координата рассматриваемой точки резонатора.

В рамках предлагаемой имитационной модели в бесконечном ряде (1) учитываются только первые четыре гармоники. Предполагается, что остальные гармоники не оказывают существенного влияния на работу резонатора. Поэтому функция плотности представляется конечной суммой:

$$\rho(\varphi) = \rho_0 \left[ 1 + \sum_{k=1}^4 \varepsilon_k \cos k(\varphi - \varphi_k) \right].$$

Таким образом, необходимо определить восемь параметров  $\varepsilon_k$ ,  $\phi_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ).

В рамках предлагаемой модели при решении дифференциального уравнения движения кольцевого резонатора с переменной плотностью учитываются основная (рис. 2) и маятниковая (рис. 3) формы колебаний.

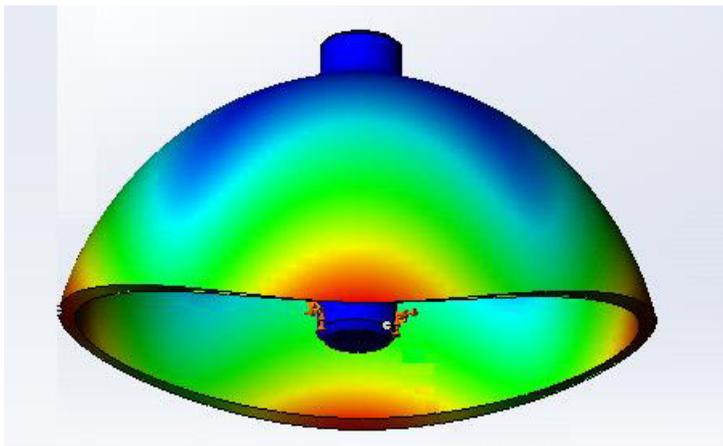


Рис. 2. Основная форма колебаний.

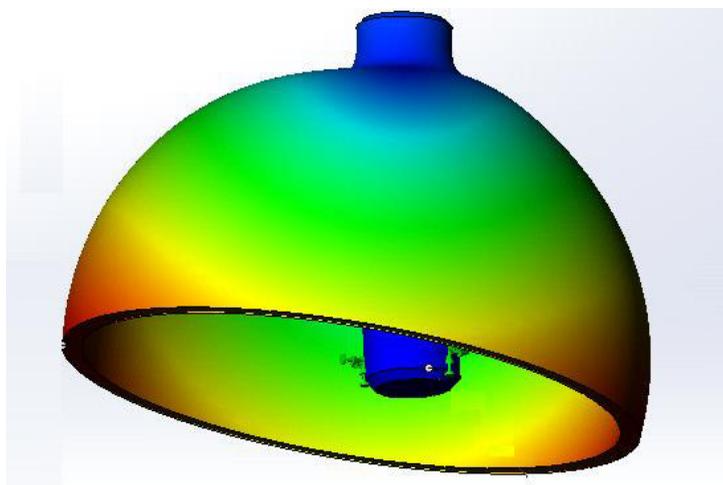


Рис. 3. Маятниковая форма колебаний.

В результате такого подхода получается система алгебраических уравнений относительно неизвестных  $x_{2k-1} = \varepsilon_k \cos k\phi_k$ ,  $x_{2k} = \varepsilon_k \sin k\phi_k$ .

(Дифференциальное уравнение и система алгебраических уравнений здесь не приведены в силу их громоздкости.) Коэффициенты в системе алгебраических уравнений определяются по сигналам чувствительных элементов ТВГ. В результате решения системы алгебраических уравнений становятся известными значения  $x_{2k-1}$ ,  $x_{2k}$ . Найденные значения  $x_{2k-1}$ ,  $x_{2k}$  позволяют определить параметры  $\varepsilon_k$ ,  $\phi_k$  по формулам

$$\varepsilon_k = \sqrt{x_{2k}^2 + x_{2k-1}^2}, \quad \phi_k = \frac{1}{k} \operatorname{arctg} \frac{x_{2k}}{x_{2k-1}}.$$

Параметр  $\phi_k$  дает угловую координату избыточной массы и, тем самым, указывает место, откуда эту массу необходимо удалить с использованием хорошо разработанных к настоящему времени технологий. Параметр  $\varepsilon_k$  дает представление о количестве избыточной массы и позволяет понять, какое количество материала резонатора необходимо удалить.

Алгоритм имитационной модели идентификации положения неоднородности плотности масс резонатора ТВГ был реализован с помощью специализированной программы Matlab в пакете программы Simulink. Исследования, проведенные с резонаторами, выпускаемыми промышленностью в настоящее время, подтвердили адекватность рассматриваемой модели.

### Выводы:

1. Специалисты в области ТВГ при решении задачи балансировки кольцевого резонатора руководствовались предположением, что вполне достаточно учитывать лишь первые четыре гармоники ряда Фурье для функции плотности  $\rho(\phi)$  [3, 4]. Ведь все остальные гармоники, начиная с пятой, соответствуют изменениям функции  $\rho(\phi)$  в пределах очень малых изменений угла  $\phi$  ( $\Delta\phi \ll 2\pi$ ) и поэтому слабо влияют на качество работы резонатора. Рассмотренная в данной работе модель дала строгое подтверждение этому предположению.

2. Предполагается, что решение дифференциального уравнения движения кольцевого резонатора следует искать в виде суперпозиции двух форм колебаний – основной и маятниковой. Другие движения (например, бегущая по окружности продольная упругая волна) не должны оказывать заметного влияния на характеристики поперечной стоячей волны. Это предположение также подтверждено рассматриваемой моделью.

**Список литературы**

1. *Матвеев, В. А.* Гироскоп – это просто. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 191 с.
2. О точности твердотельного волнового гироскопа / А. А. Айзикович, С. В. Клишин, С. А. Петрушин, В. П. Тарануха // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 25–27 нояб. 2015 г.). Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 543–547.
3. *Жбанов, Ю. К.* О балансировке волнового твердотельного гироскопа / Ю. К. Жбанов, В. Ф. Журавлев // Известия Российской Академии наук. Сер. Механика твердого тела. 15.08.1998. № 4. С. 4–16.
4. *Матвеев, В. А.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В. А. Матвеев, В. И. Липатников, А. В. Алехин. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 167 с.

S. V. *Klishin*, CSc in physics and mathematics, associate professor

A. I. *Sharonov*, master student

E-mail: serklishin@yandex.ru

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

**Imitating Model of Complex Balancing  
of Hemispherical Gyro Resonator**

*In article the technique of weight defect identification of the resonator of a hemispherical gyro from first to fourth harmonics is considered. The imitating model of complex balancing of the resonator for an estimation of a technique is created. The algorithm for this model is constructed.*

**Keywords:** hemispherical, resonator, gyro, simulation model.

УДК 53.082.5; 681.786

*И. Л. Ловчий*, канд. физ.-мат. наук, нач. сектора

E-mail: lovchy@niioep.ru

АО «НИИ ОЭП», г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

## **Моделирование параметров оптических приборов регистрации геометрических и физических величин в среде графического программирования LabVIEW**

*Описан опыт использования среды LabVIEW при виртуальном моделировании оптических измерительных приборов. Использование графического программирования при разработке схемы прибора, отладке алгоритмов обработки измерительных сигналов, виртуальном исследовании зависимости параметров разрабатываемого прибора от тех или иных факторов позволяет оптимизировать стадию его проектирования, оценить потенциальные характеристики создаваемого прибора.*

**Ключевые слова:** LabVIEW, эффект Фарадея, сфера Пуанкаре, датчик тока, чувствительность, автоколлиматор, виньетирование

### **Введение**

Стадия проектирования оптико-механической измерительной аппаратуры занимает основную часть временного промежутка от постановки задачи до изготовления реального прибора. Часто на нее приходится и основные финансовые траты из общего бюджета создания прибора. Поэтому так важно на этой стадии исследовать и учесть все возможные «подводные камни», выбрать наиболее подходящие варианты схемы прибора, оценить его потенциальные параметры. Большая часть предварительной работы может быть выполнена виртуально, например, с помощью удобной и интуитивно понятной для пользователей, не являющихся специалистами в области математического программирования в общепринятом понимании, среды графического программирования LabVIEW. В настоящей статье представлены примеры использования LabVIEW для моделирования и виртуальных исследований приборов совершенно разных классов и назначений: поляриметрических волоконно-оптических датчиков тока и фотоэлектрических автоколлиматоров.

### Поляриметрические волоконно-оптические датчики тока

В качестве чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков тока (ВОДТ) на магнитооптическом (МО) эффекте Фарадея используются специальные световоды типа *twist* и *spin*, отличающиеся технологией изготовления и поляризационными параметрами [1]. Для обоих световодов характерно наличие очень сильного внутреннего двулучепреломления (ДЛП): циркулярного для первого и линейного, со спиралевидной структурой – для второго. Наличие встроенного упорядоченного ДЛП нивелирует влияние внешних упруго-оптических эффектов на проявление эффекта Фарадея – физического механизма измерения тока, однако ограничивает чувствительность датчика по сравнению с идеальным датчиком на изотропном световоде, в котором имеет место только фарадеевское ДЛП.

В стандартной схеме поляриметрического датчика тока зондирующее, изначально линейно-поляризованное излучение после прохождения чувствительного контура расщепляется на поляризационном делителе на два пучка, относительная разность интенсивностей которых служит мерой регистрируемого тока. Для идеального изотропного световода эта разность описывается простым выражением:

$$\Delta I_{12} = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) = \sin(2N\alpha), \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – интенсивности пучков после делителя;  $\alpha = VNi$  – величина МО вращения плоскости поляризации за один проход световода;  $V$  – постоянная Верде сердцевины стекловолокна;  $N$  – число оборотов световода вокруг проводника с током  $i$ . В реальном датчике за счет наведенных внешне упруго-оптических эффектов относительная разность  $\Delta I_{12}$  уменьшается и чувствительность датчика падает.

Для виртуального моделирования параметров реального датчика использовался формализм сферы Пуанкаре [2] – представление состояния поляризации (СП) в виде точки на единичной сфере, с координатами долготы и широты, равными удвоенным азимутальному углу  $\varphi$  и углу эллиптичности  $\varepsilon$  поляризации света. Моделирование проводилось на основе анализа траектории изменения СП света, распространяющегося вдоль чувствительного волоконного контура, при варьировании параметров световода, геометрии контура, величины МО эффекта [3, 4]. Волоконный световод представлялся в виде чередующейся последовательности предельно тонких сегментов – линейных (обусловленных встроенным или наведенными внешне упруго-оптическими эффектами) и циркулярных (обусловленных оптической активностью закрученного вокруг оси волокна или МО эффектом) фазовых пластин. Изменение СП

после прохождения отдельного сегмента определялось вращением на сфере исходного положения поляризации на угол двулучепреломления, равный углу сдвига фаз  $\beta$  ортогонально поляризованных компонент, вокруг быстрой оси двулучепреломления (оптической оси фазовой пластины). Численно координаты СП света на выходе сегмента находятся из произведения матрицы поворота на радиус-вектор точки начального состояния  $(x, y, z)$ , где  $x = \cos(2\varphi)\cos(2\varepsilon)$ ,  $y = \sin(2\varphi)\cos(2\varepsilon)$ ,  $z = \sin(2\varepsilon)$ . Сама матрица поворота имеет вид [5]:

$$\begin{bmatrix} X^2 + (Y^2 + Z^2) \cos \beta & XY(1 - \cos \beta) - Z \sin \beta & XZ(1 - \cos \beta) + Y \sin \beta \\ XY(1 - \cos \beta) + Z \sin \beta & Y^2 + (X^2 + Z^2) \cos \beta & YZ(1 - \cos \beta) - X \sin \beta \\ XZ(1 - \cos \beta) - Y \sin \beta & YZ(1 - \cos \beta) + X \sin \beta & Z^2 + (X^2 + Y^2) \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Здесь  $(X, Y, Z)$  – направляющий вектор оси ДЛП. Таким образом, с использованием простых формул сферической тригонометрии строилась траектория изменения СП вдоль всего световода.

С выхода волокна излучение с измененным в соответствии с МО и упруго-оптическими эффектами состоянием поляризации умозрительно делилось анализатором – поляризационным делителем на две составляющие, интенсивность которых для 45-градусного положения анализатора (т.е. при равенстве  $I_1$  и  $I_2$  в отсутствии тока) описывается выражением

$$\Delta I_{12} = \cos 2\varepsilon \sin 2\varphi. \quad (3)$$

Виртуальная чувствительность  $\eta(\alpha)$  датчика оценивалась как

$$\eta(\alpha) = \arcsin(\Delta I_{12}/2\alpha). \quad (4)$$

В среде LabVIEW контур представлялся в виде виртуального прибора (ВП) с циклическим перебором отдельных сегментов световода и передачей по сдвиговым регистрам параметров СП и положения осей ДЛП с выхода одного сегмента ко входу другого. Для двухпроходной схемы датчика использовалась комбинация двух ВП с промежуточным преобразованием СП при обратном вводе излучения в световод.

При моделировании рассматривалось кварцевое волокно диаметром 125 мкм на длине волны 660 нм. Параметры световода типа *twist* – упруго закрученного волокна с относительной величиной закрутки  $\tau$  (об/м) – описывались наведенной оптической активностью  $\rho$  волокна ( $\rho \approx 0,079\tau$  [6]) и погонной разностью фаз  $\beta_R$  (или длиной биений  $L_R = 2\pi/\beta_R$ ) ортогонально поляризованных компонент линейного ДЛП, вызванного изгибом с радиусом  $R$  стекловолокна в пространстве при формировании чувствительного контура датчика ( $\beta_R \approx 0,005/R$  [7]). Пара-

метры световода типа *spin*, изготавливаемого из закручиваемой в процессе вытяжки волокна заготовки с сильным внутренним линейным ДЛТ с погонной разностью фаз  $\beta$  ортогонально поляризованных компонент, описывались длиной биения  $L_\beta$  внутреннего ДЛТ и периодом вращения  $L_\tau$  волокна при вытяжке.

Траектория изменения СП вдоль *twist*-световода описывается на сфере Пуанкаре окружностью, пересекающейся с экватором или касающейся с ним [8]. При этом диапазон изменения широты СП зависит от ориентации плоскости волоконных витков в пространстве относительно направления поляризации света на входе волокна и составляет от  $-\nu \div +\nu$  до  $0 \div \pm 2\nu$ , где угол  $\nu$  определяется выражением

$$\nu = \arctg(\beta_R/2\rho). \quad (5)$$

Появление тока в проводнике приводит к удлинению (или укорачиванию – в зависимости от направления тока) траектории СП вдоль световода без изменения ее формы.

Для *spin*-световода траектория изменения СП существенно сложнее. При начальном положении оси встроенного ДЛП  $\pm 45^\circ$  относительно вектора поляризации света на входном торце световода СП вдоль волокна колеблется симметрично экватора сферы в полосе широт  $\pm \chi$ :

$$\chi = \arctg(L_\tau/2L_\beta), \quad (6)$$

с периодом колебаний  $T$ , достаточно точно удовлетворяющим эмпирическому выражению:

$$T = \pi \sin^2 \chi (\cos \chi)^{-1/2}. \quad (7)$$

При ином начальном положении оси ДЛП колебательная кривая («змейка») искажается по форме и смещается от экватора к одному из полюсов сферы. Искривление волокна в пространстве вызывает добавочные возмущения траектории СП в виде наложения дополнительных колебаний относительно экватора всей «змейки» в целом. Появление тока в проводнике приводит к растягиванию (или сжатию – в зависимости от направления тока) траектории вдоль экватора, т. е. к изменению ее формы.

На рис. 1 представлены примеры траекторий изменения СП света на начальном участке контура из *spin*-световода для исходного положения оси встроенного двулучепреломления  $0^\circ$  (кривые 1 и 2) и  $45^\circ$  (кривая 3) и ориентации плоскости контура под углом  $45^\circ$  к вектору входной поляризации. Выделенные отрезки, примыкающие к концам кривых, отражают изменения координат СП на выходе начального участка при про-

пускании сквозь контур датчика знакопеременного пилообразного электрического тока. Кривые 1 и 3 соответствуют траектории СП в отсутствие тока, кривая 2 – при амплитудном значении тока.

Анализ траекторий изменения СП вдоль чувствительного контура, а также СП на выходе световода позволил вывести следующие формулы для средней чувствительности  $\eta$  датчика и диапазона возможных колебаний чувствительности  $\pm \Delta\eta$  при вращении контура в пространстве. Для датчика на основе *twist*-световода:

$$\bar{\eta} \pm \Delta\eta = (1 \pm 0,5(\beta_R/2\rho)^2) \cos^2(\arctg(\beta_R/2\rho)). \quad (8)$$

Для датчика на основе *spin*-световода:

$$\bar{\eta} \pm \Delta\eta = (1 \pm 2(L_\beta/L_R)) \cos^2(\arctg(L_\tau/2L_\beta)), \quad (9)$$

где  $L_R$  – длина биений линейного ДЛП, вызванного искривлением волокна в пространстве с радиусом изгиба  $R$ . Ниже представлены некоторые численные оценки параметров чувствительности поляриметрических датчиков тока.

Датчик на основе *twist*-световода с величиной закрутки  $\tau = 25$  об/м. При радиусе контура  $R = 56/38/31$  мм средняя чувствительность составит 99,6/98,1/95,8 % от максимальной. Диапазон варьирования чувствительности при вращении волоконных витков в пространстве  $\pm 0,2/\pm 1,0/\pm 2,0$  %.

Датчик на основе *spin*-световода с длиной биения линейного ДЛП  $L_\beta = 4,4$  мм и шагом вращения осей двулучепреломления  $L_\tau = 3,33$  мм. При  $R = 59/27/19$  мм средняя чувствительность датчика составит 87,4 % от максимального значения. Диапазон варьирования чувствительности при вращении волоконных витков в пространстве  $\pm 0,2/\pm 1,0/\pm 2,0$  %.

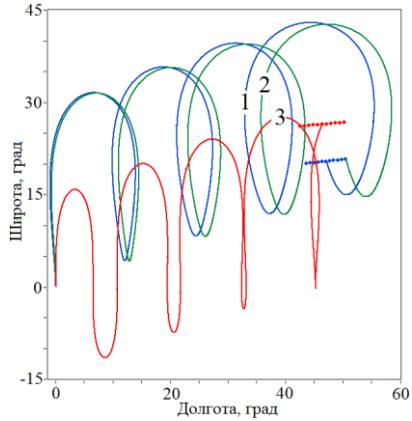


Рис. 1. Примеры траекторий изменения СП света на начальном участке контура из *spin* световода

### Фотоэлектрический автоколлиматор

В типичном фотоэлектрическом автоколлиматоре (АК) измерение угловой подвижки контрольного элемента (зеркала) относительно визирной оси АК осуществляется путем регистрации величины сдвига центра тяжести изображения марки в плоскости приемника относительно положения его фоточувствительных пикселей, причем марка и приемник расположены в сопряженных фокальных плоскостях объектива. Диапазон и точность угловых измерений зависят от фокусного расстояния и диаметра входного зрачка объектива, размеров пикселей приемника, дистанции до зеркала. Для оценки влияния различных факторов на точностные характеристики реального прибора в среде LabVIEW была разработана виртуальная модель фотоэлектрического АК. Анализировалась схема реального малогабаритного АК с диаметром входного зрачка 30 мм и фокусным расстоянием объектива 206 мм. В автоколлиматоре использовалась ПЗС-линейка из 1024 элементов с размером пикселя вдоль/поперек регистра 13×500 мкм. Для осуществления двухкоординатных угловых измерений применялась марка специальной формы [6].

Моделирование проводилось методом Монте-Карло на основе последовательной трассировки случайных лучей через все элементы оптической схемы автоколлиматора, начиная от излучающей площадки светодиода и кончая поверхностью фоточувствительных пикселей приемника. Число анализируемых лучей, прошедших марку, в зависимости от решаемой задачи составляло от сотен тысяч до нескольких миллионов штук. Каждый луч характеризовался шестью параметрами: координатами точки и направляющими лучевого вектора. Углы преломления (отражения) луча на (от) поверхности оптического элемента находились в приближении геометрической оптики в плоскости, определяемой лучевым вектором и вектором нормали к поверхности в точке пересечения.

В среде LabVIEW были разработаны ВП – программы преобразования параметров луча при пересечении плоской или сферической поверхности. Исходный массив лучевых параметров от светодиода циклически преобразовывался при пересечении поверхностей элементов схемы. Лучи, выходящие за апертуры элементов, «окрашивались» и отсеивались в конце каждого цикла. Наполняемость лучами пикселей в плоскости ПЗС-линейки симулировало форму выходного сигнала приемника, обработка которого по определенному алгоритму моделировало реакцию АК в целом.

На рис. 2 для примера представлены координаты прошедших марку лучей в плоскости установки марки (красные точки, частично перекрываются синими) и в плоскости приемника при нормальном положении зеркала относительно визирной оси АК (синие) и при наклоне и разво-

роте его на 6 угл. мин. (зеленые). Дистанция до зеркала 3000 мм. Рисунок наглядно иллюстрирует результат виньетирования лучей на апертурах элементов оптической схемы АК.

Проведение виртуальных модельных экспериментов позволяет оценить влияние различных «помеховых» факторов на точностные характеристики реального измерительного АК: дополнительное виньетирование на трассе от АК до зеркала, неравномерность чувствительности пикселей приемника, децентрировка линз объектива, дефокусировка объектива и т. д.

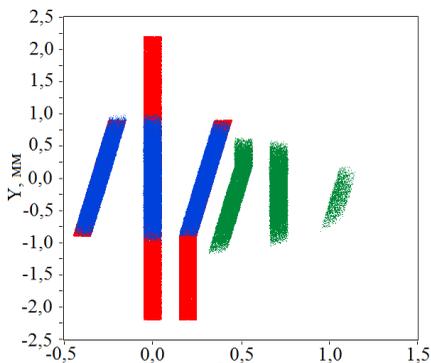


Рис. 2. Координаты лучей в плоскости марки (красные точки) и в плоскости приемника при нормальном (синие) и развернуто-наклоненном (зеленые) положении контрольного элемента АК

### Заключение

В статье представлены примеры использования технологии графического программирования LabVIEW для моделирования оптических измерительных приборов различного назначения и виртуального исследования их параметров. Возможности оперативной отладки модели, алгоритмов обработки ее измерительных сигналов, исследования реакции модели на воздействие различных факторов, наглядного представления результатов моделирования – далеко не полный перечень потенциального использования среды LabVIEW на стадии проектирования оптического прибора.

### Список литературы

1. Ulrich R., Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers // Appl. Opt. 1979. Vol. 18, no. 13. Pp. 2241-2251.
2. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет : пер. с англ. / Р. Аззам, Н. Башара. М. : Мир, 1981. 584 с.
3. Ловчий, И. Л. Моделирование параметров поляриметрического магнито-оптического датчика переменного тока с чувствительным контуром из световода типа «twist» // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 6. С. 33–46.
4. Ловчий, И. Л. Численное моделирование и исследование поляриметрического датчика тока со световодом типа spun // Оптический журнал. 2010. Т. 77, № 12. С. 25–33.
5. Лурье, А. И. Аналитическая механика. М. : Физматлит, 1961. 824 с.

6. *Smith, A. M.* Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber // *Appl. Opt.* 1980. Vol. 19, no. 15. Pp. 2606-2611.
7. *Ulrich R., Rashleigh S. C., Eickhoff W.* Bending-induced birefringence in single mode fibers // *Opt. Lett.* 1980. Vol. 5. Pp. 273-275.
8. *Rashleigh S.C., Ulrich R.* Magneto-optic current sensing with birefringent fibers // *Appl. Phys. Lett.* 1979. Vol. 34, no. 11. Pp. 768-770.
9. Пат. 2535526 Российская Федерация, МПК G02B 27/30, G01B 11/26 (2006.01). Двухкоординатный фотоэлектрический цифровой автоколлиматор / Ловчий И. Л. и др. № 2013133022 ; заявл. 16.07.2013 ; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.

*I. L. Lovchy*, CSc in phys. and math., head of sector

E-mail: lovchy@niiioep.ru

JSC «Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering»,  
Sosnovy Bor, Leningrad region

### **Modeling the Parameters of Optical Devices for Registration of Geometrical and Physical Quantities in the LabVIEW Graphical Programming Environment**

*The article describes the use of LabVIEW environment for virtual modeling of optical measuring devices. The use of graphical programming for developing the device's circuit, fine tuning of the algorithms for handling measurement signals, a virtual examination of how device's parameters depend on certain factors could all improve the designing phase and help in assessing the feasible of the device.*

**Keywords:** LabVIEW, Faraday's effect, Poincare's sphere, current sensor, sensitivity, autocollimator, vignetting

Благодарим партнеров за помощь в награждении докладчиков



---

## Keysight Technologies

Keysight Technologies является ведущим мировым производителем контрольно-измерительного оборудования и технологическим лидером, помогающим разработчикам, производителям и провайдерам услуг оптимизировать сети и ускорять продвижение электронных изделий на рынок при меньших затратах. Решения компании Keysight применяются везде, где есть электрические сигналы – от моделирования и проверки прототипов до производственного тестирования и оптимизации сетей и облачных сред. Заказчиками Keysight являются ведущие телекоммуникационные компании, аэрокосмические предприятия, представители автомобильной промышленности и энергетики, а также производители полупроводниковых приборов и бытовой электроники.

В России приборы Keysight Technologies, ранее производимые под маркой Hewlett-Packard / Agilent Technologies, используются уже более 50 лет и по праву считаются наиболее точным и надежным контрольно-измерительным оборудованием на рынке.

Генеральный директор ООО «Кейсайт Текнолоджиз» – Смирнова Галина Владимировна.

Официальный сайт: [www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)



## АО «Акметрон»

Компания АО «Акметрон» является официальным партнером *Keysight Technologies, Maury Microwave, ETS-Lindgren, MPI Corporation* и занимается внедрением высокотехнологичных решений в области автоматизации измерений для предприятий авиационно-космической и энергетической отраслей, ОПК, научно-исследовательских институтов, коммерческих предприятий, занятых в сфере разработки высокочастотного и другого электронного оборудования.

Компания предлагает комплексные решения практически на всех этапах производства:

- создание дизайн-центров по разработке ВЧ- и СВЧ-устройств и классов САПР;
- поставка, настройка зондовых станций различного класса и комплектующих, обучение персонала;
- подбор и поставка радиоизмерительных приборов;
- разработка автоматизированных комплексов;
- поставка комплексных решений для тестирования на ЭМС;
- комплексная автоматизация измерительных процессов и создание АРМ (автоматизированных рабочих мест).

На сегодняшний день компания АО «Акметрон» является одним из лидеров на отечественном рынке в направлении реализации оборудования и решений *Keysight Technologies* и автоматизированных измерительных комплексов.

В структуре компании работают 40 специалистов. Основная часть сотрудников – выпускники лучших технических вузов РФ: МИФИ, МГТУ им. Баумана, МГУ им. Ломоносова, НИУ МЭИ, МАИ, МВШЭ.

Сотрудники АО «Акметрон» постоянно повышают свою профессиональную квалификацию и проходят ежегодные технические тренинги за рубежом и в России, проводят совместные научные исследования с ведущими научными организациями РФ.

Компания имеет лицензию ФСБ России на проведение работ, связанных с использованием сведений, составляющих государственную тайну, а также сертификат соответствия требованиям ГОСТ ISO 9001–2011, что говорит о высочайшем качестве проведения работ на всех этапах работы.

Официальный сайт: [akmetron.ru](http://akmetron.ru)



## Миландр

По основным показателям деловой активности – номенклатуре и темпам роста выпускаемой продукции, количеству внедренных в производство и выполняемых проектов, а также кадровому потенциалу – компания «Миландр» за последнее десятилетие стала одним из ведущих предприятий радиоэлектронной отрасли.

Главная отличительная особенность компании – это обеспечение полного цикла создания интегральных микросхем и электронных модулей, от процессов проектирования и производства инновационных продуктов, востребованных рынком, до постоянного технического сопровождения всех реализованных проектов.

Основная специализация компании «Миландр» – реализация проектов в области разработки и производства изделий микроэлектроники (микроконтроллеры, микропроцессоры, микросхемы памяти, микросхемы приемопередатчиков, микросхемы преобразователей напряжения, радиочастотные схемы), универсальных электронных модулей и приборов промышленного и коммерческого назначения, разработки ПО для современных информационных систем и изделий микроэлектроники.

Высокий уровень инвестиционной активности компании способствует постоянному развитию инфраструктуры, оснащению предприятия современными программно-аппаратными средствами, высокопроизводительным сборочно-измерительным и испытательным оборудованием.

В течение последних десяти лет «Миландром» выполнено более 200 опытно-конструкторских работ в интересах аппаратурных промышленных предприятий. Разработано и доведено до серийного выпуска более 300 типоминиатур интегральных микросхем.

Основными потребителями изделий под маркой «Миландр» являются российские приборостроительные предприятия – изготовители аппаратуры связи, радиотехнических систем, бортовых вычислителей и систем телеметрии.

«Миландр» имеет свои представительства в городах: Москва (Зеленоград), Нижний Новгород, Воронеж и Екатеринбург. Офисные и производственные помещения, занимаемые компанией, составляют свыше 8000 м<sup>2</sup>. В коллективе компании работают более 600 высококвалифицированных специалистов, включая 21 кандидата наук.

Система менеджмента качества предприятия соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и распространяется на разработку и производство интегральных микросхем; пьезоэлектрических приборов и электромеханических фильтров, металлокерамических корпусов интегральных микросхем, многокристалльных модулей и микросборок, источников вторичного электропитания и радиоэлектронной аппаратуры.

Поставка изделий осуществляется в адрес порядка 900 предприятий радиоэлектронной промышленности.

Официальный сайт: [www.milandr.ru](http://www.milandr.ru)



## Rohde & Schwarz

**Rohde & Schwarz** – это высокотехнологичная компания, успех которой строится на инновационных решениях. В 1933 г. учеными Физико-технического университета в Йене (Германия) Лотаром Роде и Германом Шварцем была основана научно-техническая лаборатория, которая в настоящее время выросла в одного из крупнейших мировых лидеров в области контроля и измерений, телерадиовещания, радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем связи и кибербезопасности. Для поддержания высоких стандартов качества практически вся цепочка создания добавленной стоимости реализуется внутри самой компании Rohde & Schwarz. Главный научно-исследовательский центр расположен в штаб-квартире компании в Мюнхене. Ряд центров разработки находится также за пределами Германии – инженеры в США, Корее, Китае, Дании, Франции, Великобритании и Сингапуре разрабатывают продукты для мирового рынка.

**Контроль и измерения.** Rohde & Schwarz – это один из крупнейших в мире производителей электронного оборудования для контроля и измерений, широко применяемых в областях беспроводной связи, телерадио- и эфирного телевидения, проведения испытаний на ЭМС, технологий мониторинга и анализа радиосигналов, генерации тестовых сигналов, имитации спутников ГЛОНАСС / GPS. Наши изделия устанавливают стандарты в исследованиях, разработке, производстве и обслуживании в аэрокосмической и оборонной отраслях, в автомобильной индустрии, в научных исследованиях и промышленной электронике для создания новейших беспроводных технологий, а также для радиочастотных и СВЧ-систем (до 500 ГГц).

**Телерадиовещание и мультимедиа.** Более чем в 80 странах мира телерадиовещание ведется с использованием передатчиков Rohde & Schwarz. Наши передатчики наряду с нашим контрольно-измерительным и студийным оборудованием способствуют мировому прогрессу цифрового вещания и обработки видео в форматах высокой четкости.

**Защищенная связь.** Управление гражданским воздушным движением на протяжении десятилетий полагается на системы связи Rohde & Schwarz. Компания предоставляет самые современные интегрированные решения защищенной радиосвязи: от рабочего места оператора до антенны. Среди них можно выделить: программно-конфигурируемые радиостанции, традиционные радиостанции, системы речевой связи, системы управления и контроля управления воздушным движением, системы обработки сообщений. Также компания обладает средствами для защищенного, надежного и быстрого обмена информацией для использования на суше, на море и в воздухе, применяемыми в вооруженных силах.

**Радиоконтроль.** Спектр радиочастот – это ограниченный ресурс. С целью оптимального использования распределение радиочастот контролируется правительственными регулирующими органами и ведется согласно нормам МСЭ. Rohde & Schwarz предоставляет необходимое оборудование для обнаружения, пеленгации и анализа радиосигналов, используемое для обеспечения обществен-

---

ной и национальной безопасности, а также радиомониторинга и распределения частот на государственном уровне.

**ИТ-безопасность.** Угроза кибератак вынуждает каждую организацию, которая эксплуатирует ИТ-системы, принимать меры защиты, чтобы обеспечить безопасность своей интеллектуальной собственности и гарантировать конфиденциальность данных своих заказчиков. Наши средства ИТ-безопасности обеспечивают индивидуально настраиваемую защиту для компаний любого масштаба.

На российском рынке оборудование Rohde & Schwarz появилось в 1957 г. С тех пор, благодаря собственным технологиям и новаторским идеям сотрудников фирмы, Rohde & Schwarz является одним из технологических лидеров для российских заказчиков различных государственных и силовых структур.

В 1993 г. в Москве состоялось официальное открытие российского представительства фирмы Rohde & Schwarz. В 2005 г. начал свою работу сервисный центр, деятельность которого осуществляется на территории России и стран СНГ. Мы можем по всему миру предоставить пакет сервисных услуг, соответствующих высокому качеству наших продуктов.

Официальный сайт: [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)



## National Instruments

Компания National Instruments предлагает единую программную и аппаратную платформу для экспериментальных исследований в классических и новых междисциплинарных областях науки: от молекулярной биологии, биофизики, биомедицины до физики высоких энергий, физики наноразмерных эффектов, телекоммуникаций и микроэлектроники.

Благодаря высокой производительности, функциональной гибкости аппаратной части, интуитивно понятному графическому языку программирования NI LabVIEW платформа National Instruments стала стандартом для оснащения лабораторий и автоматизации научных установок.

Компания National Instruments более 20 лет активно сотрудничает с ведущими мировыми инженерными школами, создавая все необходимые условия для успешной педагогической и научно-исследовательской деятельности в школах, учреждениях СПО и вузах.

Компания National Instruments отлично зарекомендовала себя как надежный партнер ведущих зарубежных и российских университетов и научно-исследовательских организаций. Мы способствуем повышению технологического и методического уровня лабораторий в соответствии с современными международными стандартами, активно занимаемся внедрением на территории России современных образовательных программ зарубежных университетов.

Партнерские отношения с университетами по всему миру позволяют компании NI поддерживать межвузовские и международные научные проекты, налаживать связи с ведущими российскими и зарубежными промышленными предприятиями с целью коммерциализации наукоемких разработок.

Основным преимуществом компании National Instruments является весомый опыт в реализации масштабных проектов по оснащению учебных заведений и внедрению инновационных технологий в методики и программы обучения.

Проектная деятельность National Instruments включает:

- модернизацию учебных и исследовательских лабораторий;
- внедрение современных подходов к обучению, разработку курсов и методических материалов;
- подготовку мероприятий, направленных на мотивацию студентов для получения инженерного образования;
- повышение квалификации для преподавателей, студентов и специалистов промышленных предприятий;
- участие в совместных НИР и ОКР.

Уникальность образовательной программы NI заключается в применении современных информационных технологий и оригинальных учебных платформ, с помощью которых удастся построить непрерывный образовательный процесс подготовки будущих инженеров и научных сотрудников. Знания и навыки, полученные с помощью технологий National Instruments, ученик с успехом начинает применять, развивать и совершенствовать, став студентом технического вуза, а в будущем и специалистом на предприятии или в исследовательской лаборатории.

В течение 10 лет компания National Instruments поддерживает и развивает партнерские отношения с ведущими вузами России, внедряя самые современные технологии и методики обучения в образовательный процесс. Более 200 учебных заведений в России успешно используют технологии NI для подготовки высококвалифицированных специалистов в самых различных технических дисциплинах, от основ электротехники до робототехники и микроэлектроники.

Результатом успешного сотрудничества крупнейших российских вузов и компании National Instruments стало создание более 30 авторизованных учебных центров. В центрах проводится обучение студентов, аспирантов и других сотрудников вузов программированию в среде LabVIEW, работе с аппаратным обеспечением по официальным авторизованным программам и курсам National Instruments. Центрам предоставляется возможность участия в технических семинарах, конференциях и других мероприятиях, проводимых компанией National Instruments.

Важным аспектом сотрудничества является предоставление центрам лицензии на проведение учебных курсов по технологиям National Instruments, а также возможности проведения собственных коммерческих разработок с использованием аппаратного и программного обеспечения NI.

Образовательные центры открыты в таких вузах, как МГУ имени М. В. Ломоносова, РУДН, НИЯУ МИФИ, МЭИ, МИРЭА, МИТХТ им. Ломоносова, СГАУ, ННГУ, НГТУ, СПбГЭТУ (ЛЭТИ), ЮФУ, ТУСУР, ТПУ, ВлГУ и многих других.

Официальный сайт: [www.ni.com](http://www.ni.com)



## Новые инженерные технологии

Компания «**Новые инженерные технологии**» специализируется на поставках, монтаже, обслуживании и поверке измерительных приборов разных типов, а также систем телерадиовещания, радиомониторинга, оборудования для сетей мобильных операторов, антенн, приборов для тестирования измерительного и телекоммуникационного оборудования.

У нас десятилетний опыт работы на российском рынке измерительного и телекоммуникационного оборудования, опыт внедрения автоматизированных процессов с помощью аппаратных и программных средств для предприятий оборонного комплекса.

В компании ведутся собственные разработки. Нами разработан стенд для тестирования абонентских терминалов ЭРА-ГЛОНАСС/eCall. Стенд позволяет осуществлять тестирование с возможностью осуществления приема-передачи необходимых данных посредством тонального модема, SMS и установки голосового канала.

Наша компания предлагает гарантийное и постгарантийное обслуживание, предоставляет оборудование, приборы взамен вышедших из строя или находящихся на поверке.

Мы реализуем проекты за рубежом – производим экспорт товаров и оказываем услуги на территории зарубежных заказчиков. Осуществляем ввоз импортного оборудования производителей, не имеющих представительств в России.

Все это создает репутацию надежного делового партнера. Наши клиенты всегда получают именно то оборудование и другие технические средства, которые оптимально подходят для решения их задач.

Прямое сотрудничество с ведущими производителями дает важное преимущество нашей компании, поэтому мы можем предложить выгодные цены и реальные сроки поставки.

С помощью нашей компании вы сможете повысить эффективность своей работы, поднять уровень автоматизации на производстве, тем самым сможете увеличить прибыльность вашего бизнеса.

Официальный сайт: [www.neweng.ru](http://www.neweng.ru)



*Электронное научное издание*

«ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2019.  
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА»

Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции  
(Ижевск, 20–22 ноября 2019 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:  
[http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21\\_2019.pdf](http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2019.pdf)

Дата размещения на сайте: 20.11.2019

Технический редактор *С. В. Звягинцова*  
Корректор *И. В. Ганеева*  
Верстка *С. Е. Фокиной*

Подписано к использованию 20.11.2019. Объем 9,3 Мб  
Уч.-изд. л.13,73. Заказ № 388

Издательство Ижевского государственного технического университета  
имени М. Т. Калашникова  
426069, Ижевск, Студенческая, 7