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

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2017. ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции
(Ижевск, 22–24 ноября 2017 года)

Издательство ИжГТУ
имени М. Т. Калашникова
Ижевск 2018

УДК 681.2(06)
П75

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

В. П. Грахов, председатель организационного комитета, д-р экон. наук, ректор ИжГТУ;

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

А. В. Губерт, зам. председателя, первый проректор;

В. А. Алексеев, зам. председателя, д-р техн. наук, проф., секретарь ученого совета ИжГТУ;

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

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

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

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

Б. И. Сибгатуллин, ст. преподаватель;

Ю. К. Шелковников, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. Института механики УрО РАН;

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

Д. В. Бохонько, технический директор ООО «СТМ»;

С. Б. Николичев, зам. директора по развитию ООО «ИИКП»;

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

НАУЧНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

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

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

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

И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Электротехника», рук. секции 3;

А. Н. Копысов, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Радиотехника», рук. секции 4;

А. И. Нистюк, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сети связи и телекоммуникационные системы», рук. секции 4;

В. В. Соболев, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой «Физика и оптотехника», рук. секции 5;

А. А. Айзикович, канд. физ.-мат. наук, доц., зав. кафедрой «Прикладная математика и информатика», рук. секции 6.

П75 **Приборостроение в XXI веке – 2017. Интеграция науки, образования и производства** [Электронный ресурс]**:** сб. материалов XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 22–24 нояб. 2017 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2018. – 741 с. – 25,9 Мб (PDF). – Систем. требования: Acrobat Reader 6.0 и выше.

ISBN 978-5-7526-0800

В сборник материалов вошли материалы секций конференции. Рассматривается широкий круг вопросов в области приборостроения.

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

УДК 681.2(06)

ISBN 978-5-7526-0800

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

Содержание

Секция 1. **Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение**

Бабошкина А. А., Ушаков П. А., Бабошкин Г. Д. Разработка методики настройки коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма 10

Белослудцев В. Н., Ушаков П. А. Исследование генератора хаоса дробного порядка, построенного на системе Нозе – Гувера 17

Беляева Е. А. Контроль качества танталовых конденсаторов на основе анализа выявляемых дефектов в процессе производства и эксплуатации 23

Бояринцева Е. С., Драчев А. В., Рылов С. А., Глушков В. А. Расчет и моделирование спиральной антенны для телекоммуникации с низкоорбитальным спутником в программной среде CST Microwave Studio 30

Гаврилов А. В., Шумилова Т. А., Яшина Д. С., Глушков В. А. Анализ онлайн-сервисов, предназначенных для схемотехнического моделирования электрических схем, и сравнение их с OrCAD 34

Глушков В. А., Балашов А. В., Халисламова А. Р., Кислицин М. В. Умное городское освещение..... 42

Гравшин В. Г., Глушков В. А. Модель водородного топливного элемента в системе компьютерного моделирования Matlab..... 49

Данилов Е. О., Хабибуллин Р. Д., Зорин К. А. Исследование методов для распознавания и воспроизведения текста 56

Долгачева Л. О., Баженов Н. Д., *Глушков В. А.* Анализ методов исследования температурного поля и процесса теплообмена 63

Иванов А. В. Графический интерфейс программы расчета надежности паяных соединений..... 68

Князев И. В., Миронов А. А., Савченко Н. А., Митрошина А. А., *Глушков В. А.* Сравнение возможностей анализа динамических характеристик линейных систем в программе Matlab и с помощью интернет-ресурса Wolfram Alpha..... 76

Маклашов В. А., Пиганов М. Н. Блок контроля и управления лазерной системой..... 83

Максимов К. О., Первякова Ю. А., Порошин Э. В., Симкина Е. В., Ушаков П. А. Анализ параметров толстопленочных элементов с фрактальным импедансом со структурой слоев R-C-NR..... 89

Манченко И. В., Марченко И. С., Глушков В. А. Сравнение магнитопроводов, применяемых в трансформаторах блоков питания космической техники 96

Мукминов Р. Р., Михайлов А. Н., Глушков В. А. Анализ реакции пассивной RC-цепи и ее передаточной функции во временной области на заданное воздействие с применением онлайн-системы SystemVision 105

Печенкин А. Ю. Оценка требуемых вычислительных ресурсов для реализации алгоритмов обработки изображений с неохлаждаемых микроболометрических матриц 111
Симкина Е. В., Первякова Ю. А., Порошин Э. В., Ушаков П. А., Максимов К. О. Опыт изготовления многослойных толстопленочных элементов со структурой слоев R-C-NR 117
Трифонова Е. С., *Глушков В. А.* Обзор ресурсов солнечной энергетики на территории г. Ижевска 124
Ушаков П. А., Шамсиахметов О. Я. Использование методик ТРИЗ в структурном синтезе и оптимизации электронных схем 129
Хайрутдинов И. А., *Ушаков П. А.* Применение энергособирателей для увеличения времени работы систем дистанционного контроля 137

Секция 2. **Приборы в промышленности, здравоохранении и экологии**
Балобанов Е. Н., Брагин Г. В., *Подсизерцева М. А.* Подход к проектированию контрольно-проверочной апаратуры на базе приборов National Instruments для техники специального назначения 141
Богдан О. П., Волков В. В. Исследование акустических свойств биологических сред 146
Богдан О. П., Волков В. В., Муравьева О. В. Моделирование упругих деформаций продольной пьезопластины в программной среде Comsol 154
Богдан О. П., Злобин Д. В., *Бабайлов Н. А., Дудина Ю. С.* Разработка формирователя пузырьков на основе пьезокерамики CH-s42 для устройства оценки интенсивности ультразвукового излучения 161
Богдан О. П., Подсизерцева М. А. Исследование влияния температуры машинного масла на его акустический импеданс 167
Богдан О. П., Подсизерцева М. А. Оценка достоверности методики измерения акустического импеданса моторного масла 173
Булдакова И. В., Волкова Л. В., *Казанцев С. В., Понькин М. А.* Измерение напряжений в отдельных элементах рельса 179
Волкова Л. В. Исследование акустической анизотропии листового проката с использованием продольной и изгибной волн 186
Гусев М. А., Колясев В. А., Копытов А. Г. Измерительный блок сканирующего коэрцитиметра 194
Злобин Д. В., Нуриев В. Ф., Гущина Л. В. Прибор для измерения скорости акустических волн 200
Зорин В. А. Исследование влияния структуры поверхности прутков после термической обработки на скорость рэлеевской волны 206
Кириллов А. И., *Матросов А. В.*, *Кожевников М. П.*, *Шелковникова Т. Е.* Программное обеспечение электрометрического комплекса для диагностики твердых тканей зуба 213

Копысов Я. А. Особенности метода определения артериального давления по Н. Н. Савицкому при декомпрессии манжеты 219
Коробейников А. В., Камалова Ю. Б. Применение сверточной нейронной сети LeNet для классификации изображений зерен пыльцы 228
Мирошников В. В., Булыгин Н. С. Идентификация дефектов при непрерывном контроле протяженных изделий 233
Мирошников В. В., Лавренченко А. В. Построение систем электромагнитного контроля концентрации проводящих веществ в организме человека 238
Мирошников В. В., Петрущенко Т. В. Анализ дефектов действующих промышленных объектов 245
Муравьев В. В., Синцов М. А., Будрин А. Ю., Зорин А. В. Акустическая структуроскопия усталости при циклическом нагружении стальных прутков 253
Муравьев В. В., Тапков К. А. К вопросу приемочного контроля остаточных напряжений в рельсах 260
Муравьева О. В., Муравьев В. В., Синцов М. А., Стрелков В. С., Шкляев А. Е. Влияние фактора разных плавок при производстве пруткового проката на скорости акустических волн 269
Мышкин Ю. В., Стрелков В. С. Моделирование распространения крутильной и стержневой волны в прутке с дефектами 278
Мышкин Ю. В., Фотина А. А., Кощеева Ю. О. Моделирование угловой фокусировки в трубе большого диаметра 289
Петров К. В., Федорова Г. Л., Башарова А. Ф. Исследование фокусировки акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем 298
Пономарев В. А., Пономарева Н. В. Цифровой спектрально-временной анализ музыкально-акустических сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье 307
Пономарева О. В., Пономарев А. В. Виброакустическое функциональное диагностирование объектов. Взгляд на проблему 313
Пономарева О. В., Пономарева В. Ю., Марков Д. Н. Метод повышения функциональных возможностей визуализации объектов в медицинских ультразвуковых диагностических приборах 320
Пономарева О. В., Ходырев В. Д., Пушкарева Т. К., Шагбедов А. В. Цифровая обработка виброакустических сигналов в среде LabVIEW на персональном компьютере 326
Савенков А. П., Сафонова М. Э., Сычев В. А., Чечетов К. Е. Бесконтактные аэродинамические измерения поверхностного натяжения и вязкости жидкостей 336
Соков М. Ю., Муравьева О. В., Захаров А. С. Моделирование физических полей проходного электромагнитно-акустического преобразователя в деталях с резьбой 344

Степанов В. А., Белых В. В., Ломаев Г. В., Кошелева Е. В. Информационно-энтропийные процессы при некролизе пчелы 353
Urakseev M. A., Vazhdaev K. V., Sagadeev A. R. Acoustooptical Converter for Distributed information-Measuring Systems..... 360
Швалев И. А., Волкова Л. В. Экспериментальные исследования анизотропии листов с использованием волн Лэмба..... 367
Шелковников Е. Ю., Кириллов А. И., Кожевников М. П., Матросов А. В. Разработка информационно-измерительной системы для диагностики твердых тканей зуба..... 373
Шигапов Р. И., Ворсина А. С. Метод компьютерной пульсоксиметрии для диагностики синдрома обструктивного апноэ сна..... 381
Шишкин Д. О., Ворончихин С. Ю., Самокрутов А. А. Оценка типа дефекта по угловому распределению амплитуды ультразвуковой волны, отраженной несплошностью, при контроле с применением внутритрубного сканера-дефектокопа А2072 IntroScan..... 387
Элбакян А. Г. Разработка и исследование процесса пироакустической обработки первичных холстов супертонкого базальтового волокна..... 393
Якимов А. В. Сравнение остаточных напряжений в рельсах, изготовленных по разным технологиям..... 399
Яковенко В. В., Швец С. Н., Ливцов Ю. В. Прибор контроля качества виброупрочнения поверхностного слоя ферромагнитных деталей..... 405

Секция 3. **Приборы в системах управления и контроля**
Ардашев Е. Я., Штин А. А. Разработка лабораторного стенда для исследования электронного счетчика электроэнергии..... 411
Горохова В. В., Фокеев А. Е. Определение дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник в элементах электрических сетей с учетом фактического вклада потребителей в несинусоидальность тока и напряжения..... 418
Джауль А. Л., Штенников И. В. Алгоритм расчета температуры стальной детали в процессе вакуумного хромирования при фазовых превращениях в стали..... 423
Зямилов Р. И., Стародубцева В. А. Анализ возможности использования микроконтроллеров AVR для управления «умным домом»..... 431
Капшунов И. А., Иванов П. Н., Штин А. А. Стенд для изучения переключаемых диодов..... 436
Каракулов М. Н., Исупов М. Г., Мельников А. С., Гришина Т. Ф. Опыт использования плунжерных передач с газомеханическим волнообразователем для управления приводами трубопроводной арматуры..... 441
Кожевников К. В., Штенников И. В. Расширение функциональных возможностей источника питания асинхронного двигателя вентилятора и моделирование его работы..... 448

Матросов Н. С., Стародубцева В. А. Особенности использования современного высокоточного оборудования в металлообрабатывающих цехах 454
Петров Б. С., Ардашев Е. Я., Фокеев А. Е. Анализ функциональных возможностей современных микропроцессорных счетчиков электрической энергии 459
Пиманова О. В. Исследование уровня адаптированности студентов второго курса 464
Родионов И. Д., Морозов А. В. Проектирование электродвигателя навесного оборудования унифицированной машины технологического электротранспорта 472
Стародубцева В. А., Мазитов А. С. Поиск путей решения проблем, связанных с учетом и распределением электрической энергии 476
Шелковников Ю. К., Кизнерцев С. Р., Метелева А. А. Информационно-измерительные системы с дифференциальным вариантом включения сканистора для изучения динамики быстропротекающих процессов 482
Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Ермолин К. С., Метелева А. А. Применение фотопотенциометрического варианта включения сканистора в задачах автоматического контроля за пространственно-временным состоянием объекта 489
Штенников И. В., *Мельников И. А.* Разработка устройства бесконтактного контроля температуры резистивного испарителя в вакуумных установках 497
Штенников И. В., *Черешев В. И.* Методика приготовления образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium» для исследования ее электрической прочности 504
Штин А. А., Мельников О. С. Лабораторный стенд для исследования трансформаторов тока 509
Юсупов Д. А. Измеритель толщины неферромагнитных материалов 514

Секция 4. **Информационные технологии в радиотехнике и связи**
Бояршинов М. А., *Балашов А. В.* Моделирование работы средств радиоэлектронного подавления и их влияние на процесс передачи информации 519
Бояршинов М. А., Зыкин А. А. Методика моделирования радиолинии, использующей сигналы с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех 525
Бояршинов М. А., Зыкин А. А. Помехоустойчивость сигналов ФМ-2 с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех 533
Гумиров Р. Ф. Конфигурирование SDR с помощью GNU Radio 539
Дершиева Н. А., Нистюк А. И. Интерфейсы телекоммуникационных устройств повышенной надежности 546

Емельянов В. Н., Емельянова М. М., Титов В. В., Шамонов М. Ю. Уязвимость механизма аутентификации в WPA2 553
Емельянова М. М., Баженов М. Н., Дунькин А. С., Емельянов В. Н. Современные системы краудсорсинга и их уязвимости 561
Ермаков В. С., Емельянова М. М. Реализация коммутатора в бортовой телеметрической системе 569
Жидяев А. В., Копысов А. Н. Исследование способов оценки фазы несущей сигнала с GMSK 575
Закиров А. А., Шишаков К. В. Алгоритмическое обеспечение макета бесплатформенной инерциальной навигационной системы на основе твердотельных волновых гироскопов 582
Каргашин Е. К., Зайцева Е. М. Организация системы сопровождения движения подвижного состава на Российских железных дорогах с использованием средств радиосвязи 588
Копысов А. Н., Богатырева А. А. Выбор методов анализа отказов аппаратуры систем безопасности, используемой в железнодорожном транспорте 593
Похващев В. Н., Хакимов Н. Т., Комарский Р. И. Устройство беспроводного обмена информацией между выносным индикатором и станцией радиотехнической разведки 598
Сидорина В. А., Пасынкова Д. А., Урсегова Е. Д. Использование облачных технологий в проектной деятельности студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» 607
Сидорина В. А., Салтыков П. В., Ильязова Г. И. Организация самостоятельной работы студентов радиотехнического профиля с использованием технологии скринкастинга 611
Симонов М. В., Шишаков К. В. Моделирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем на вертикальных траекториях для парашютного спуска 615
Трофимова Н. Л., Моряков В. Н., Емельянова М. М., Емельянов В. Н. Влияние помех на работу технологии NFC при бесконтактной оплате 622

Секция 5. **Физические методы в приборостроении**
Алексеев В. А., Усольцев В. П., Шульмин Д. Н. Регистрация сброса загрязняющих веществ в сточные воды промышленного предприятия 628
Буранов Д. Н., Усольцев В. П. Нанесение графических элементов на биоматериал с помощью лазера 636
Дойников Р. Г., Калугин А. И., Антонов Е. А. Система регистрации оптического сигнала лазерного термометра 640
Иванов А. В., Калюжный Д. Г. Исследование импульсной проводимости в резистивных пленках 645
Корепанова А. Г., Кривенков Р. Ю., Михеев Г. М. Нелинейное поглощение в красных стеклянных фильтрах на длине волны 1064 нм 648

Лебедева М. Ю. Изучение свойств магнетиков с помощью нелинейного электромагнитно-акустического преобразования 655
Мазин М. А., Паранин В. Д. Измерение оптической разности хода градиентной линзы на основе астигматического преобразования пучка Бесселя..... 660
Рубцова Н. А., Калюжный Д. Г., Бурнышев И. Н., Александров В. А. Лазерное модифицирование поверхности Ag-Pd-пленок..... 665
Селезнев А. Н., Калюжный Д. Г., Бурнышев И. Н. Лазерная система контроля материала нефтегазопровода 669
Усольцев В. П., Уразманова О. И. Контроль загрязнений сточных вод с использованием лазерного зондирования 673
Усольцев В. П., Уразманова О. И., Гарифуллин С. Ф., Фомин Г. А. Разработка методики для формирования экспериментальной базы данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий 679
Усольцева А. В. Исследование поверхности обугливаемых материалов при лазерной обработке 687
Юран С. И., Татарских А. Ю. Мобильный фотоплетизмограф 693

Секция 6. **Алгоритмы и программные системы для приборостроения**
Абрамов И. В., Федоров Е. М., Волосков С. Н. Моделирование многослойных пакетных пьезоактуаторов..... 702
Мокрова С. М., *Милич В. Н.* Алгоритм выбора достоверных ориентаций при расшифровке данных рентгенодифракционного анализа..... 711
Назмутдинова А. И., Милич В. Н. Применение вейвлет-преобразования для интерпретации данных с беспилотного летательного аппарата... 719
Тебуева Ф. Б., Петренко В. И., Антонов В. О., Рябцев С. С. Разработка алгоритма построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики..... 727
Тебуева Ф. Б., Петренко В. И., Антонов В. О., Сычков В. Б. Разработка способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора.....733

Секция 1. **Конструирование и производство электронных средств. Космическое приборостроение**

УДК 621.316.718

А. А. Бабошкина, магистрант
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.
Г. Д. Бабошкин, аспирант
E-mail: glbaboshkin@rambler.ru
Ижевский государственный университет имени М. Т. Калашникова

Разработка методики настройки коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка с помощью генетического алгоритма

В представленной статье рассматривается основная проблема проектирования систем автоматического управления на основе ПИД-регуляторов дробного порядка – отсутствие математического аппарата для расчета коэффициентов регулирования. Описаны положительные стороны применения ПИД-регляторов дробного порядка в современных САУ. Описана математическая интерпретация коэффициентов дробного дифференцирования и интегрирования регулятора, а также представлены выражения АЧХ и ФЧХ САУ с апериодическим звеном первого порядка. В качестве критерия отбора коэффициентов регулирования выбран запас по фазе САУ, равный 60°. Предложена методика расчета коэффициентов регулирования для генетического алгоритма, основывающаяся на решении системы уравнений АЧХ и ФЧХ САУ.

Ключевые слова: система автоматического управления, фрактальный ПИД-регулятор, ПИД-регулятор дробного порядка, элемент с фрактальным импедансом, генетический алгоритм, оптимизация параметров управления.

Введение

Ввиду необходимости проектирования систем автоматического управления для разнообразных целей и с различными требованиями

© Бабошкина А. А., Ушаков П. А., Бабошкин Г. Д., 2018

появляется необходимость в создании новых цепей обратных связей, обеспечивающих минимальную ошибку управления (менее 8%) при минимально возможном времени управления системы [1]. Одним из примеров таких цепей является ПИД-регулятор дробного порядка.

Сведения из теории

Математически обоснована положительная сторона подобного рода ПИД-регуляторов: большее число настраиваемых параметров ПИД-регулятора дробного порядка обеспечивает большее число степеней свободы передаточной функции САУ [2], что графически можно отобразить следующим образом (рис. 1).

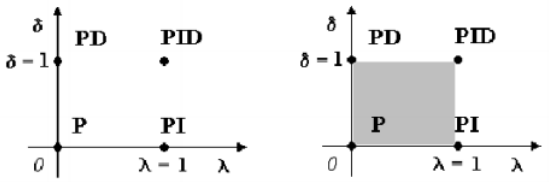


Рис. 1. Число степеней свободы САУ с целочисленным ПИД-регулятором (слева) и с дробным ПИД-регулятором (справа)

Из рис. 1 понятно, что классический ПИД-регулятор является частным случаем дробного ПИД-регулятора, и для более широкого круга объектов управления практичнее бы было применять последние. Существует модель аналоговой реализации ПИД-регулятора дробного порядка, который отличается от классического тем, что конденсаторы в цепях И- и Д-звеньев заменены элементами с фрактальным импедансом (ЭФИ).

ЭФИ – элемент радиоцепи, характеризующийся наличием в ФЧХ диапазона постоянства фазы (ДПФ) величиной от 0º до 90º, а также наклоном линейного участка АЧХ менее –20 дБ/дек. Более подробное описание ЭФИ отражено в [3]. Подробный анализ так называемого фрактального ПИД-регулятора (ФПИД-регулятора), а также его преимущества по сравнению с классическим описаны в [4].

Однако на сегодняшний день не существует математического аппарата для расчета коэффициентов ФПИД-регулятора, а ручной подбор коэффициентов занимает достаточно много времени. Решением данной проблемы мог бы быть генетический алгоритм, предназначенный для расчета коэффициентов ПИД-регулятора дробного порядка.

Целью данной статьи является разработка методики использования генетического алгоритма для автоматизированной настройки коэффициентов ФПИД-регулятора на примере САУ, объектом управления которой является апериодическое звено первого порядка.

Решение задачи

Для описания генетического алгоритма необходимо свести проблему проектирования ФПИД-регулятора к решению конкретной задачи. Для этого необходимо провести анализ САУ и определить необходимые критерии управления.

Поставим условия. Допустим, объектом управления САУ является апериодическое звено первого порядка, передаточная функция которого определяется общим выражением (1):

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{K_{\text{ус}}}{T_{\text{вр}} \cdot s + 1}, \tag{1}$$

где $K_{\text{ус}}$ – максимальный коэффициент передачи объекта управления; $T_{\text{вр}}$ – постоянная времени объекта.

В цепи обратной связи САУ находится ПИД-регулятор дробного порядка, передаточная функция которого определяется выражением (2):

$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_{\text{И}} \cdot s^{\lambda} + \frac{K_{\text{Д}}}{s^{\delta}} + K_{\text{П}}, \tag{2}$$

где λ – порядок ЭФИ И-звена, $0 < \lambda < 1$; δ – порядок ЭФИ Д-звена, $0 < \delta < 1$; $K_{\text{д}}$ – коэффициент дифференцирования, $K_{\text{и}}$ – коэффициент интегрирования, $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, передаточная функция системы управления будет определяться выражением (3):

$$W_{\text{САУ}} = \frac{K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{И}} \cdot s^{\lambda+\delta} + K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{П}} \cdot s^{\delta} + K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{Д}}}{K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{И}} \cdot s^{\lambda+\delta} + T_{\text{вр}} \cdot s^{\delta+1} + (K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{П}} + 1) \cdot s^{\delta} + K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{Д}}}. \tag{3}$$

Из формулы (3) видно, что основными параметрами, определяющими частотные характеристики САУ, являются λ, δ, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{д}}$, $K_{\text{и}}$. Если с первыми тремя все достаточно ясно, то параметры $K_{\text{д}}$ и $K_{\text{и}}$ не имеют точной физической интерпретации. Для классического ПИД-регулятора эти параметры определяются как постоянные времени цепей интегрирования и дифференцирования.

Реактивные параметры ЭФИ в [3] определяются фрактальной емкостью, например для элемента с порядком δ:

$$C_{\delta} = \frac{1}{f_0^{\delta} Z(f_0)} \left[\frac{c^{\delta}}{\text{Ом}} \right], \tag{4}$$

где δ – отношение максимального фазового поворота ФЧХ ЭФИ к фазовому повороту ФЧХ элемента первого порядка, то есть δ = ПФ/90°. $Z(f_0)$ – величина импеданса ЭФИ на частоте f_0.

Учитывая размерность выражения (4), предположим, что для САУ с ФПИД-регулятором:

$$K_{\text{И}} = \frac{R_{\text{И}}}{f_{\text{И}}^{\lambda} Z(f_{\text{И}})} [c^{\lambda}], \tag{5}$$

$$K_{\text{Д}} = \frac{f_{\text{Д}}^{\delta} Z(f_{\text{Д}})}{R_{\text{Д}}} \left[\frac{1}{c^{\delta}} \right]. \tag{6}$$

Тогда передаточная функция ФПИД-регулятора (2) становится безразмерной, что позволяет нам использовать выражения (5) и (6), где $f_{\text{и}}$ и $f_{\text{д}}$ – частоты из диапазона постоянства фаз ЭФИ цепей интегрирования и дифференцирования.

Необходимым условием качественного управления системы является ее устойчивость. Наиболее удобный для наших исходных данных критерий устойчивости – это критерий Найквиста, который определяется запасом по фазе от 30 до 60°. Запас по фазе определяется через аргумент передаточной функции разомкнутой САУ на частоте, на которой коэффициент передачи системы равен 1 дБ, согласно выражению (7):

$$\Delta\Phi = 180^{\circ} + \phi(f\big|_{A=1\partial Б}). \tag{7}$$

Тогда передаточная функция разомкнутой САУ (8):

$$W_{\text{раз}} = \frac{K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{И}} \cdot s^{\lambda+\delta} + K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{Д}} + K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{П}} \cdot s^{\delta}}{T_{\text{вр}} \cdot s^{\delta+1} + s^{\delta}}, \tag{8}$$

отсюда АЧХ (9) и ФЧХ (10) разомкнутой САУ:

$$A(\omega)=\frac{K_{\text{ус}}}{\left(T_{\text{вр}}^2\omega^2+1\right)\omega^{\delta}}\sqrt{2K_{\text{Д}}\left(1-T_{\text{вр}}^2\omega^2\right)\left(K_{И}\cdot\cos\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)+K_{\text{П}}\omega^{\delta}\cos\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)\right)+}$$

$$+\left(1+T_{\text{вр}}^2\omega^2\right)\left(2K_{\text{И}}K_{\text{П}}\omega^{2\delta+\lambda}\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)+K_{\text{П}}^2\omega^{2\delta}+K_{\text{Д}}^2\right)-4T_{\text{вр}}K_{\text{П}}K_{\text{Д}}\omega^{\delta+1}\sin\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)+T_{\text{вр}}^2K_{\text{И}}^2\omega^{2(\delta+\lambda+1)}+$$

$$+K_{\text{И}}^2\omega^{2(\delta+\lambda)}\cos^2\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)-2T_{вр}K_{И}^2\omega^{2\delta+2\lambda+1}\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)-2T_{вр}K_{И}K_{П}\omega^{2\delta+\lambda+1}\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)+$$

$$+2T_{вр}^2K_{И}K_{Д}\omega^{\delta+\lambda+2}\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)\sin\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)-2T_{вр}K_{И}K_{Д}\omega^{\delta+\lambda+1}\left(\sin\left(\frac{(\delta+\lambda)\pi}{2}\right)+\sin\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)\right)}; \quad (9)$$

$$\phi(\omega)=\text{arctg}\frac{T_{\text{вр}}K_{\text{Д}}\omega\cos\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)+K_{\text{Д}}\sin\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)-T_{\text{вр}}K_{\text{И}}\omega^{\delta+\lambda+1}\times}{K_{\text{И}}\omega^{\delta+\lambda}\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)-T_{\text{вр}}\omega^{\delta+\lambda+1}K_{\text{И}}\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)+K_{\text{П}}\omega^{\delta}+}$$

$$\frac{\times\cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)-T_{\text{вр}}K_{\text{П}}\omega^{\delta+1}}{+K_{\text{Д}}\cos\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)-T_{\text{вр}}K_{\text{Д}}\omega\sin\left(\frac{\delta\pi}{2}\right)}. \quad (10)$$

Определимся, что наилучшие характеристики управления достигаются при запасе по фазе САУ 60º. Таким образом, задача проектирования ФПИД-регулятора сводится к задаче нахождения коэффициентов λ, δ, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{и}}$, $K_{\text{д}}$, при имеющихся константах $T_{\text{вр}}$, $K_{\text{ус}}$, обеспечивающих выполнение условия ΔΦ = 60º, используя генетический алгоритм.

Структуру генетического алгоритма определим следующей последовательностью.

1. Выбор случайных наборов «родителей», которыми здесь являются ряды коэффициентов (λ, δ, $K_{\text{п}}$, $K_{\text{и}}$, $K_{\text{д}}$). Коэффициенты λ и δ ограничены условиями: λ(0;1); δ(0;1).

2. Решение уравнения A(ω) = 1 для всех рядов коэффициентов и вычисление целевой функции (12) для каждого ряда коэффициентов.

3. Вычисление «коэффициента выживания» для каждого из ряда по формуле

$$K_{\text{выж}}=\left|\Delta\Phi_{\text{эт}}-\Delta\Phi_{i}\right|,$$

где $\Delta\Phi_{эт} = 60^{\circ}$, а $\Delta\Phi_i$ – полученный запас по фазе для *i*-ряда коэффициентов.

Очевидно, что чем меньше коэффициент выживания, тем ближе параметры ПИД-регулятора к оптимальным.

4. «Размножение» – выборка новых рядов данных, полученных путем смешивания рядов «родителей», по стандартным алгоритмам, например «кроссоверинг».

5. Отбор из массивов «родителей» и «потомков» наиболее подходящих для дальнейшей работы.

6. «Мутация» – изменение членов отобранных массивов по заранее заложенному алгоритму, чаще всего произвольная замена одного из элементов массивов.

7. Отбор и повторение алгоритма.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока не наберется достаточное количество отобранных массивов коэффициентов согласно условию $K_{выж} \leq 10$.

Вывод

Данная методика позволяет получить приближенные коэффициенты регулирования, что уже значительно ускоряет процесс проектирования ФПИД-регулятора для конкретной САУ. Таким образом, используя параметры ПИД-регулятора, полученные с помощью классических законов ручной настройки [1] в качестве начальной популяции, а также результаты работы приведенного ГА, можно более быстро построить САУ с высокими критериями точности управления.

Однако если в генетическом алгоритме задаться большим числом характеристик управления САУ, такими как ошибка управления и время регулирования, то можно проводить последующее моделирования САУ с отобранными в пункте 7 результатами и проводить повторную селекцию коэффициентов регулирования.

Список литературы

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

2. Analogue Realizations of Fractional Order Controllers / I. Petras, I. Podlubny, P. O'Leary, L. Dorcak, B. M.Vinagre. – Fakulta BERG, TU Kosice, 2002. – 84 p.

3. *Ушаков, П. А.* Проектирование функциональных устройств микроэлектроники на основе резистивно-емкостных сред. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2012. – 159 с.

4. *Baboshkin, G. D.* Fractional order PID-controller based on fractional impedance component [Electronic resource] / G. D. Baboshkin, S. Dulesov, P. A. Ushkov // Fifth Forum of Young Researchers : Proceedings (February 22, 2017, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2017.– Pp. 40–49. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=29162262 (access date: 29.01.2018).

A. A. Baboshkina, magister student
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
G. D. Baboshkin, postgraduate student
E-mail: glbaboshkin@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Development of the Method for Tuning the Coefficients of Fractional Order PID-Controller Frequency Using the Genetic Algorithm

The article deals with the main problem of designing the automatic control systems based on fractional order PID-controllers – the absence of a mathematical apparatus for calculating of control coefficients. The positive aspects of the application of fractional order PID regulators in modern automatic control system (ACS) are described. The mathematical interpretation of coefficients of fractional differentiation and integration for the regulator, as well as the expressions of amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the ACS with the aperiodic link of the first order are presented. As a criterion for selection of regulation coefficients the selected phase margin of ACS is equal to 60°. The method of genetic algorithm regulation coefficients calculating is presented, based on solving the system of equations of frequency and phase response of the ACS.

Keywords: automatic control system, fractal PID-controller, fractional order PID-controller, element with fractal impedance, genetic algorithm, control parameters optimization.

УДК 621.373.9

В. Н. Белослудцев, магистрант
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.
E-mail: bvl15@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование генератора хаоса дробного порядка, построенного на системе Нозе – Гувера

Демонстрируется вариант схемотехнической реализации генератора хаотических колебаний и результаты исследования. Произведено сравнение характеристик генераторов с интегратором целого и дробного порядка. Также в работе отображены временные характеристики, спектры мощности и фазовые портреты при различных порядках интегрирования.

Ключевые слова: генератор хаоса дробного порядка, система Нозе – Гувера, элемент с фрактальным импедансом, моделирование в программе Simulink, моделирование в программе LTspice.

Введение

Открытие динамического хаоса (ДХ) Э. Лоренцом во второй половине XX в. [1] изменило представление о характере нелинейных динамических систем. Хаотические системы стали центром повышенного интереса в научной среде. Последние несколько десятилетий явление хаоса активно исследовалось.

Стало очевидно, что явление ДХ возможно применять в электронике, защите информации и системах связи. Для реализации этих возможностей необходимо иметь источники хаотических сигналов. Поэтому одним из приоритетных направлений использования ДХ является создание генератора хаотических колебаний.

Описание эксперимента

Генератор динамического хаоса (ГДХ) – это устройство, способное создавать сложные непериодические колебания, которые определяются свойствами нелинейной динамической системы.

Известны генераторы хаотических колебаний, построенные на системе Нозе – Гувера [2]. Целью данной работы является исследование

© Белослудцев В. Н., Ушаков П. А., 2018

генератора хаоса с интегратором дробного порядка, который описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{d^{\alpha}x}{dt^{\alpha}} = y \\ \dfrac{dy}{dt} = y \cdot z - x, \\ \dfrac{dz}{dt} = 1 - y^2 \end{cases} \quad (1)$$

где α – дробный показатель интегрирования переменной *x*.

Математическая модель генератора хаоса, реализующая данную систему, построена в программе Simulink и представлена на рис. 1.

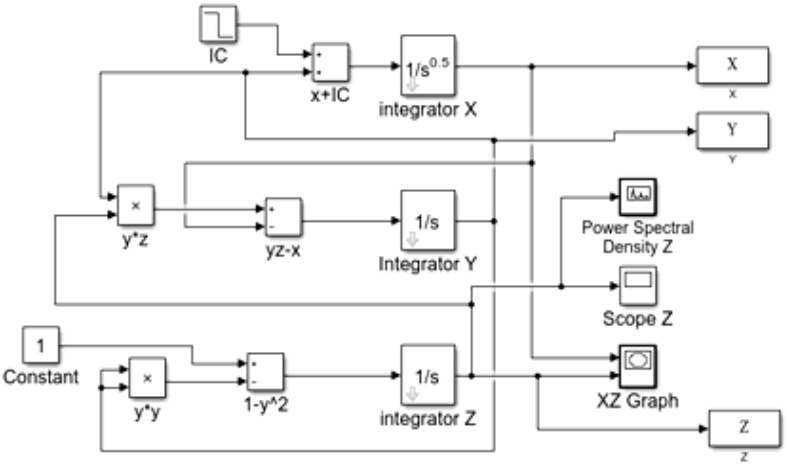


Рис. 1. Математическая модель генератора хаоса с интегратором дробного порядка

Результаты и их обсуждение

Для простоты анализа генератора система рассматривается с одним дробным интегратором. На рис. 2 изображены фазовые портреты колебаний при различных степенях интегрирования α. Видим, что изменением порядка интегрирования возможно менять вид аттрактора. В отличие от целочисленного генератора аттрактор при некоторых значениях α выглядит хаотичнее.

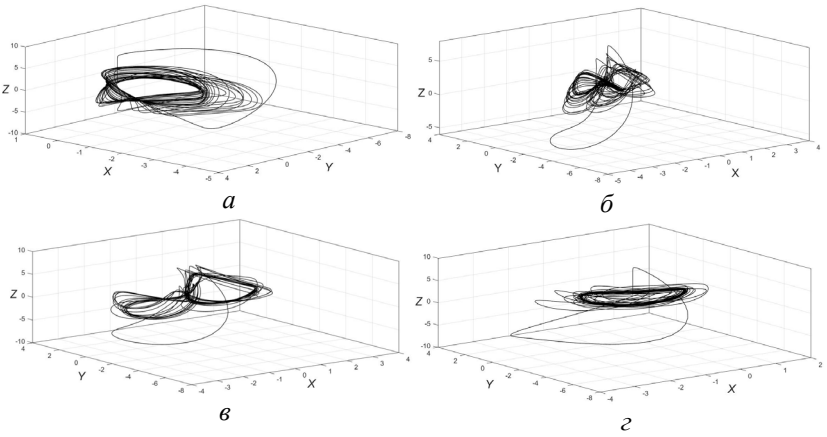


Рис. 2. Фазовый портрет аттрактора Нозе – Гувера при порядке интегрирования α: *а* – 1; *б* – 0,5; *в* – 0,8; *г* – 1,2

В результате моделирования выяснилось, что при $\alpha > 1$ вид аттрактора менее хаотичен. На временной диаграмме рис. 3, *г* наблюдается переход к гармоническому режиму. Таким образом, при необходимости ГХ возможно использовать для генерации гармонических колебаний.

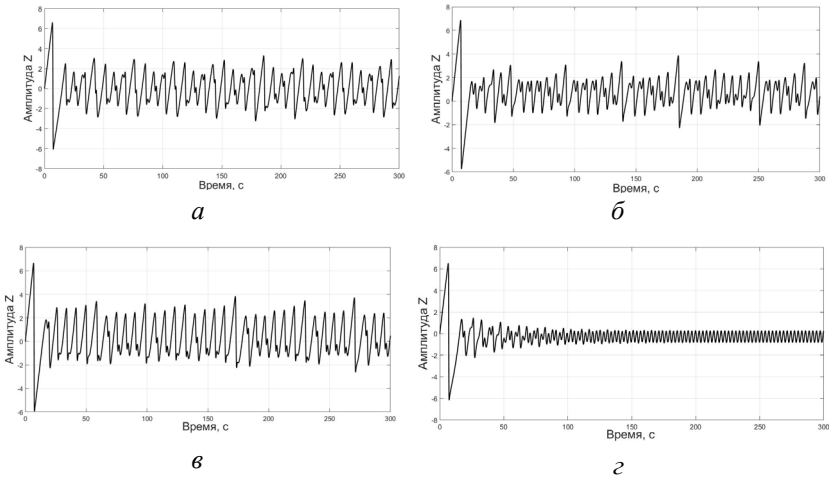


Рис. 3. Временные диаграммы на выходе переменной *z* при степенях интегрирования α: *а* – 0,5; *б* – 0,8; *в* – 1; *г* – 1,2

Для того чтобы определить, в каком частотном диапазоне работает ГХ, выполним преобразование Фурье временных диаграмм. Спектры сигнала на выходе интегратора переменной *z* при различных степенях интегрирования α представлены на рис. 4.

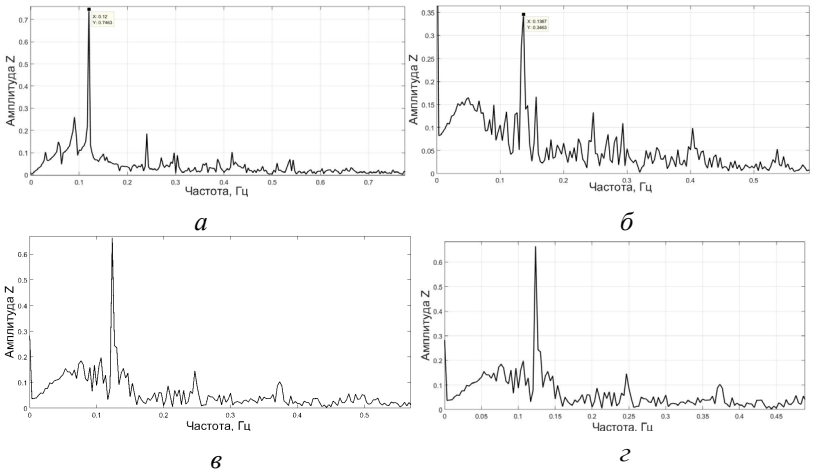


Рис. 4. Спектр сигнала на выходе интегратора переменной *z* при степени α: *а* – 0,5; *б* – 0,8; *в* – 1; *г* – 1,2

Из рис. 4 видно, что спектр сигнала зависит от порядка интегрирования. Частота и амплитуда основной гармоники изменяется, а также изменяется ширина спектра.

В настоящее время данный генератор хаоса можно реализовать на практике в аналоговом виде, используя как классические интеграторы на ОУ, так и интеграторы дробного порядка, в которых конденсаторы заменяются на так называемые фрактальные элементы, описанные, например, в [3] и изготовленные на кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» ИжГТУ. На рис. 5 представлена схемотехническая модель генератора хаоса, построенная на операционных усилителях TL072 и аналоговых умножителях AD633. На ОУ выполнены операции инверсии, вычитания, интегрирования и усиления. Умножение переменных выполняется аналоговым умножителем.

Для создания схемотехнической модели генератора хаоса дробного порядка конденсатор в цепи интегратора переменной *x* заменен на элемент с фрактальным импедансом [3]. Применение такого элемента позволяет создать интегратор или дифференциатор дробного порядка.

На рис. 6 представлен печатный узел генератора хаоса дробного порядка, спроектированный по схеме на рис. 5.

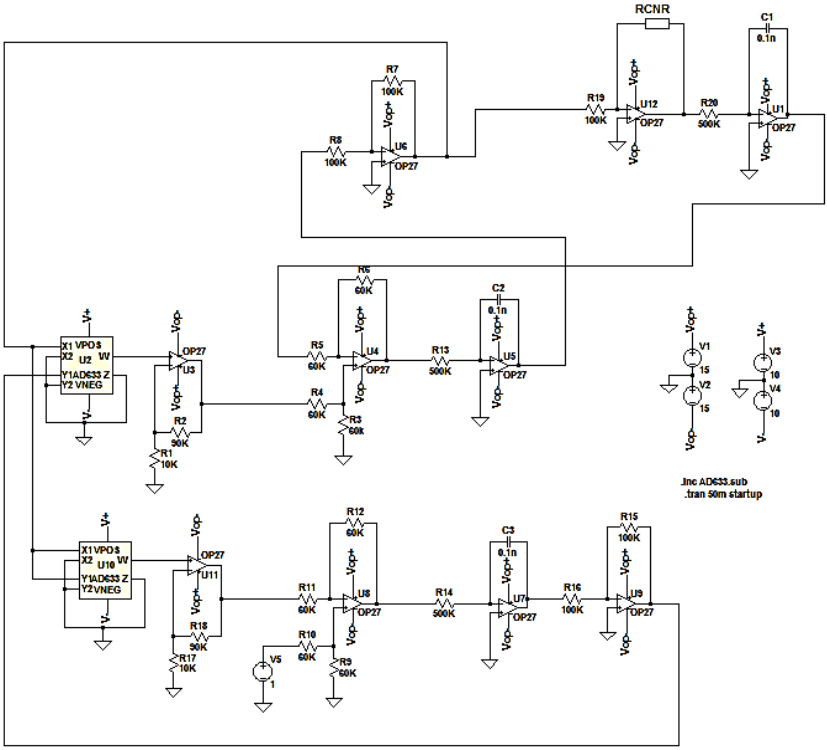


Рис. 5. Схемотехническая модель генератора хаоса дробного порядка, построенная на системе Нозе – Гувера

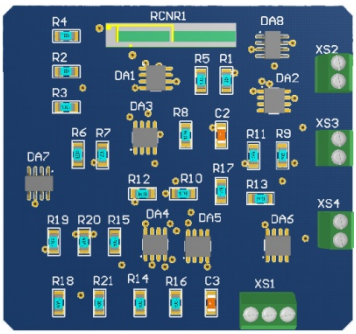


Рис. 6. Вид печатного узла генератора хаоса дробного порядка

Выводы

Результаты работы показали, что применение интегратора дробного порядка в системе оказывает влияние на режим работы генератора. Изменение степени интегрирования меняет вид аттрактора, временных диаграмм и диапазон рабочих частот.

Анализ показал, что применение ЭФИ в схеме увеличивает количество динамических режимов, а изменение постоянной времени интегрирования позволяет изменять диапазон рабочих частот. Режимы работы математической и схемотехнической моделей при дробном интегрировании с одинаковым порядком отличаются. Это связано с непостоянством фазы ЭФИ и разными постоянными времени интегрирования.

Таким образом, в генераторе дробного порядка появляется дополнительная степень свободы, которую можно использовать для расширения класса физических процессов, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка.

Список литературы

1. *Lorenz, E.* Deterministic nonperiodic flow // Journal of the Atmospheric Sciences, 1963. – Vol. 20. – No. 2. – Pp. 130–141.

2. *Verlet, L.* Computer “experiments” on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules // Phys. Rev., 1967. – Vol. 159. – Pp. 98–103.

3. Passive fractional-order components based on resistive-capacitive circuits with distributed parameters / P. Ushakov, A. Shadrin, D. Kubanek, J. Koton // Proc. Int. Conf. Telecommunications and Signal Proc. – TSP 2016, Vienna, Austria, 2016. – Pp. 638–642.

V. N. Belosludtsev, magister student
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
E-mail: bvl15@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Research of the Generator of Chaos of the Fractional Order Constructed on the Nose – Hoover System

The paper presents a study of the fractional order chaos generator built on the Noze – Hoover system. The mathematical model of chaos generator and the results of computer simulation in Simulink are presented. The variant of circuit implementation of the generator of chaotic oscillations and the results of the study are demonstrated. The characteristics of the generators are compared with the integrator of the whole and fractional order. Time characteristics, power spectra and phase portraits are also displayed in the paper at different integration orders.

Keywords: fractional order chaos generator, Nose – Hoover system, fractal impedance element, modeling in Simulink, modeling in LTspice.

УДК 620.17:658.56

Е. А. Беляева, аспирант
E-mail: belyaeva-work@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Контроль качества танталовых конденсаторов на основе анализа выявляемых дефектов в процессе производства и эксплуатации

Разработана методика контроля качества танталовых конденсаторов на основе анализа видов и последствий потенциальных дефектов, возникающих на этапах технологического процесса и обнаруживаемых в процессе эксплуатации, подлежащая апробации в производстве танталовых конденсаторов.

Ключевые слова: танталовый конденсатор, качество, надежность, дефект, производство, эксплуатация.

Введение

Применение статистических методов при управлении качеством является важнейшим компонентом производственной и инженерной культуры на любых производствах. Для исследования характера, степени и причин изменчивости технологического цикла продукции, даже в условиях очевидной стабильности, и для последующего введения корректирующих действий возможно применение статистического анализа на стадии изготовления. В некоторых научных школах считается, что оперативную и объективную оценку уровня качества и надежности изделий возможно осуществить по статистике возвратов [1, 2]. Так как приведенные в литературных источниках [3–12] методики не отражают полное статистическое управление качеством танталовых конденсаторов, задачей исследования является разработка принципов и методов статистического регулирования качеством тан-

© Беляева Е. А., 2018

таловых конденсаторов на основе анализа выявляемых дефектов в процессе производства и эксплуатации.

Разработка методики системного межэтапного анализа качества танталовых конденсаторов

1. *Системный статистический анализ возвращенных танталовых конденсаторов*

Статистическая оценка качества танталовых конденсаторов, отклоненных потребителем по претензионному документу (далее по тексту – претензионные изделия), производится по группе однотипных изделий (серии), или изделию, или типономиналу, исходя из данных по отказам в течение периода Δt, по двум направлениям: всех претензионных изделий и изделий, признанных «по вине изготовителя», в следующей последовательности:

– определение интервала времени Δt, за который необходимо провести анализ, исходя из частоты возникновения дефектов;

– определение группы однотипных конденсаторов, к которым имеется больше претензий потребителей в интервале Δt;

– количественная оценка потребителей, которые имеют больше претензий к качеству изделий в интервале времени Δt;

– установление видов дефектов конденсаторов;

– отбор наиболее критичных конденсаторов, наиболее значимых дефектов и установление прослеживаемости между отказами в предыдущий и настоящий периоды;

– оценка показателей качества наиболее критичных изделий по дефектам с указанием места обнаружения дефекта (испытания, входной контроль, производство, эксплуатация) по критериям:

· частота возникновения дефекта у различных потребителей:

$$f_n(t) = \frac{\Sigma n(t)}{Q(t)}; \qquad (1)$$

· частота возникновения дефекта у конкретного потребителя:

$$f_i(t) = \frac{n_i(t)}{N_i(t)}; \qquad (2)$$

· интенсивность отказов:

$$\lambda = \frac{n(t)}{(Q(t) - n(t)) \cdot \Delta t}; \qquad (3)$$

· процент дефектной продукции

$$N_{\text{деф}} = \frac{Q_{\text{Д}}}{Q(t)} \cdot 100\ \%, \qquad (4)$$

где $\Sigma n(t)$ – общее количество обнаруженных дефектов (одного вида) конденсаторов у разных потребителей в интервале времени Δt; $Q(t)$ – общее количество поставленных конденсаторов в интервале времени Δt; $n_i(t)$ – количество обнаруженных дефектов конденсаторов, поставленных одному потребителю в интервале времени Δt; $N_i(t)$ – общее количество поставленных данному потребителю конденсаторов в интервале времени Δt; $n(t)$ – общее количество подтвердившихся дефектов отказавших конденсаторов в интервале времени от $(t - (\Delta t/2))$ до $(t + (\Delta t/2))$; Δt – интервал времени, за который проводится анализ; $Q_{\text{д}}$ – количество конденсаторов, имеющих неустранимые дефекты, признанные по вине изготовителя (у всех потребителей) в интервале времени Δt;

– оценка значимости результатов анализа претензионных изделий путем построения матрицы анализа претензионных изделий.

2. *Анализ качества танталовых конденсаторов в зависимости от конструктивного, технологического и производственного аспектов*

– Определение видов потенциальных дефектов конденсаторов, вероятных причин возникновения и возможных последствий.

– Исследование вероятности влияния конструкционной недоработки или дефектов конструкции конденсаторов на возникновение отказов.

– Анализ технологического и производственного этапов конденсаторов, в том числе:

установление перечня ключевых технологических операций;

построение причинно-следственной диаграммы вероятности возникновения дефекта по методу Иссикавы на выбранных операциях и проставление баллов значимости для каждой возможной причины по табл. 1;

выявление наиболее значимых (особо ответственных) или критичных операций, вероятных причин возникновения дефекта исходя из баллов значимости;

статистический анализ показателей качества технологического процесса танталового конденсатора, включающий анализ стабильности выхода годных и статистическую оценку показателей настроенности, точности, стабильности технологического процесса на наиболее значи-

мых (особо ответственных) или критичных операциях; оценка уровня технологической дисциплины при производстве танталовых конденсаторов (с указанием отклонений).

3. *Анализ качества танталовых конденсаторов с учетом корреляции «производственного» и «эксплуатационного» этапов*

– Оценка значимости последствия дефекта по шкале баллов значимости *S* (см. табл. 1).

– Оценка вероятности возникновения причины дефекта путем установления балла вероятности возникновения *O* по табл. 2.

– Оценка сложности обнаружения причины возникновения дефекта по шкале баллов сложности обнаружения *D* (см. табл. 3).

Таблица 1. **Рекомендуемые корреляционные баллы значимости последствия дефекта *S***

№ п/п	Последствие	Балл *S*
1	Опасное без предупреждения	10
2	Опасное с предупреждением	9
3	Очень важное	8
4	Важное	7
5	Умеренное	6
6	Слабое	5
7	Очень слабое	4
8	Незначительное	3
9	Очень незначительное	2
10	Отсутствует	1

Таблица 2. **Рекомендуемые корреляционные баллы вероятности возникновения причины дефекта *O***

№ п/п	Вероятность возникновения дефекта	Возможная частота дефектов	Балл *O*
1	Сверхвысокая	Более 1 из 2	10
2	Очень высокая	1 из 5	9
3	Высокая	Более 1 из 10	8
4	Средневысокая	1 из 25	7
5	Умеренная	Более 1 из 100	6
6	Среднеумеренная	1 из 500	5
7	Низкоумеренная	1 из 2000	4
8	Низкая	Более 1 из 10000	3
9	Очень низкая	Более 1 из 100000	2
10	Малая	Менее 1 из 1000000	1

Таблица 3. **Рекомендуемые корреляционные баллы сложности обнаружения причины *D***

№ п/п	Обнаружение	Балл *D*
1	Почти невозможно	10
2	Очень плохое	9
3	Плохое	8
4	Очень слабое	7
5	Слабое	6
6	Умеренное	5
7	Умеренно хорошее	4
8	Хорошее	3
9	Очень хорошее	2
10	Почти наверняка	1
*Вероятность обнаружения дефекта при контроле до следующего или последующего процесса или до того, как конденсатор не будет полностью изготовлен		

– Оценка комплексного риска (далее по тексту – КР) возникновения дефектов танталовых конденсаторов на основе экспертных оценок (*S*, *O*, *D*):

$$\text{КР} = S \cdot O \cdot D. \quad (5)$$

Для дефектов, имеющих несколько причин возникновения, определить соответственно несколько КР. При расчете КР использовать один максимальный балл значимости *S* из всех последствий дефекта. Независимо от значения КР рекомендуется в первую очередь рассмотреть дефекты или причины с высокими рангами значимости ($S = 8 \div 9$); для дефектов или причин с рангом значимости 8 или ниже рассмотреть причины, имеющие высокие ранги возникновения или обнаружения.

– Сравнение КР с критической границей $\text{КР}_{\text{ГР}}$. Для приоритетного числа риска возникновения дефекта критическую границу ($\text{КР}_{\text{ГР}}$) для танталовых конденсаторов установить 125, в некоторых случаях значение может быть установлено менее 100.

– Составление перечня дефектов/причин, для которых значение $\text{КР} \geq \text{КР}_{\text{ГР}}$, с установлением системы приоритетов для рассмотрения корректирующих действий.

– Установление причин или механизмов возникновения дефектов танталовых конденсаторов.

– Разработка корректирующих или предупреждающих мероприятий.

– Оценка эффективности корректирующих или предупреждающих мероприятий путем проставления новых экспертных оценок *S, O, D* и оценки КР возникновения дефекта.

Вывод

Разработана методика системного межэтапного функционального анализа качества танталовых конденсаторов, позволяющая управлять качеством танталовых конденсаторов на основе анализа видов и последствий потенциальных дефектов, возникающих на этапах технологического процесса и обнаруживаемых в процессе испытаний и эксплуатации конденсаторов. Для внедрения в производство данная модель подлежит апробации в производстве танталовых конденсаторов и, при необходимости, корректировке.

Благодарность

Особую благодарность за оказанную помощь при создании методики выражаю моему руководителю научной работы В. В. Муравьеву, руководителям и специалистам ОАО «Элеконд».

Список литературы

1. *Арефьев, И. Б.* Метод оценки технического уровня изделия по мониторингу рекламаций в системе управления качеством производства / И. Б. Арефьев, А. А. Клавдиев, А. В. Воловик // Программные продукты и системы. – 2014. – № 3 (107). – С. 86–92.

2. *Назаренко, М. А*. Современное моделирование процессов рекламационной деятельности / М. А. Назаренко, И. А. Баранова, Т. В. Хронусова // Методы менеджмента качества. – 2017. – № 5. – С. 40–44.

3. *Беляева, Е. А*. Управление производством танталовых конденсаторов с жидким электролитом посредством контроля операционного выхода годных / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2015. – № 2 (66). – С. 72–75.

4. *Кузнецова, В. А.* Метод ускоренных испытаний сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 7. – С. 57–60.

5. *Беляева, Е. А.* Влияние пористости и режимов оксидирования анода на качество танталовых конденсаторов с жидким электролитом / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 3. – С. 62–70.

6. *Кузнецова, В. А*. Прогнозирование сохраняемости танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов по временной зависимости /

В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2016. – № 4 (72). – С. 69–72.

7. *Кузнецов, П. Л.* Контроль качества электролитических танталовых конденсаторов с использованием стресс-теста / П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1. – С. 76–80.

8. *Кузнецова, В. А*. Влияние конструктивных характеристик анода на эксплуатационные параметры оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2014. – № 4 (64). – С. 105–107.

9. *Кузнецова, В. А.* Влияние качества корпуса оксидно-полупроводниковых танталовых чип-конденсаторов на эксплуатационные параметры / В. А. Кузнецова, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 112–115.

10. *Беляева, Е. А.* Влияние переменной синусоидальной составляющей пульсирующего напряжения при оксидировании объемно-пористых анодов танталовых конденсаторов на электрические параметры / Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – №. 2 (24). – С. 96–102.

11. *Кузнецова, В. А.* Исследование надежности танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов на основе экспериментальных данных / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, В. В. Муравьев // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2013. – № 3 (59). – С. 88–91.

12. Исследование влияния на эксплуатационные характеристики качества материалов танталовых оксидно-полупроводниковых чип-конденсаторов / В. А. Кузнецова, П. Л. Кузнецов, Е. А. Беляева, В. В. Муравьев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2 (22). – С. 140–143.

E. A. Belyaeva, postgraduate student
E-mail: belyaeva-work@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Quality Control of Tantalum Capacitors Based on the Analysis of Detected Defects in the Production and Operation Process

Method of tantalum capacitors quality control based on the analysis of detected defects in the production and operation process was investigated and should be subject to approbation.

Keywords: tantalum capacitor, quality, reliability, defect, production, operation.

УДК 621.396.67

Е. С. Бояринцева, магистрант
E-mail: bettykb@yandex.ru
А. В. Драчев, магистрант
С. А. Рылов, магистрант
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
E-mail: vladimir.glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Расчет и моделирование спиральной антенны для телекоммуникации с низкоорбитальным спутником в программной среде CST Microwave Studio

В работе представлены результаты расчета и моделирования спиральной антенны для связи с низкоорбитальным спутником. Моделирование произведено с использованием программного продукта CST Microwave Studio. Разработанная антенна удовлетворяет выбранным критериям наземной станции.

Ключевые слова: спиральная антенна, диаграмма направленности, низкоорбитальный спутник, наземная станция, моделирование.

Введение

Для того чтобы осуществить связь со спутником во время его пребывания на орбите, необходимо спроектировать наземную станцию, одной из важнейших частей которой является антенна. При ее расчете нужно учесть множество параметров и учесть влияние, оказываемое окружающей средой на передаваемый сигнал.

Выбор и обоснование типа антенны

Предполагается, что разрабатываемое антенное устройство будет рассчитано на связь с низкоорбитальными малогабаритными спутниками формата Cubesat, с ориентировочной высотой орбиты до 400 км и работающими в UHF-диапазоне.

После проведения анализа миссий ранее запущенных спутников Cubesat [1] были подобраны оптимальные параметры системы:

- мощность передатчика наземной станции – от 0,5 до 15 Вт;
- мощность передатчика наноспутника – до 1 Вт;

© Бояринцева Е. С., Драчев А. В., Рылов С. А., Глушков В. А., 2018

- расстояние от наземной станции до спутника – 350 км;
- модуляция – BFSK;
- вероятность появления ошибочного бита -10^{-5};
- частота сигнала – 446 МГц;
- фоновый шум – 174 дБм/Гц;
- скорость передачи – 9600 бит/с.

Для антенного устройства была выбрана антенна спирального типа, имеющая подходящие характеристики (диаграмма направленности и коэффициент усиления), а также простоту и дешевизну производства.

Расчеты и моделирование

Расчет параметров антенн проводится по следующим формулам [5]:

1) Диаметр спирали, мм:

$$D = \frac{\lambda}{\pi}, \tag{1}$$

где λ – длина волны, которая рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{c}{f}, \tag{2}$$

где c – скорость света, f – частота волны.

2) Шаг спирали:

$$s = \pi \cdot D \cdot \mathrm{tg}(\alpha), \tag{3}$$

где α – угол наклона витка спирали.

3) Длина спирали:

$$L_a = N \cdot s, \tag{4}$$

где N – количество витков антенны, s – шаг спирали.

4) Длина проводника:

$$L = N\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}. \tag{6}$$

Моделирование было проведено в программном пакете CST Microwave Studio, который представляет собой программу, предназначенную для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях.

Лучшие результаты получены при следующих параметрах:

– длина волны – 0,672 м;
– радиус спирали – 0,107 м;
– количество витков – 9;
– шаг спирали – 0,142 м (12°);
– длина спирали – 1,278 м;
– длина проводника – 6,185 м.

Геометрическое изображение конструктива антенны показано на рис. 1.

Антенна с наилучшими параметрами дает усиление в направлении главного лепестка равное 14 дБи (рис. 2, 3).

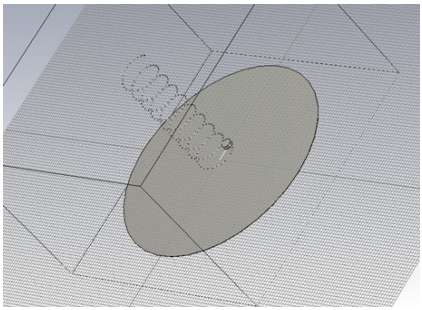


Рис. 1. Создание 3D-модели

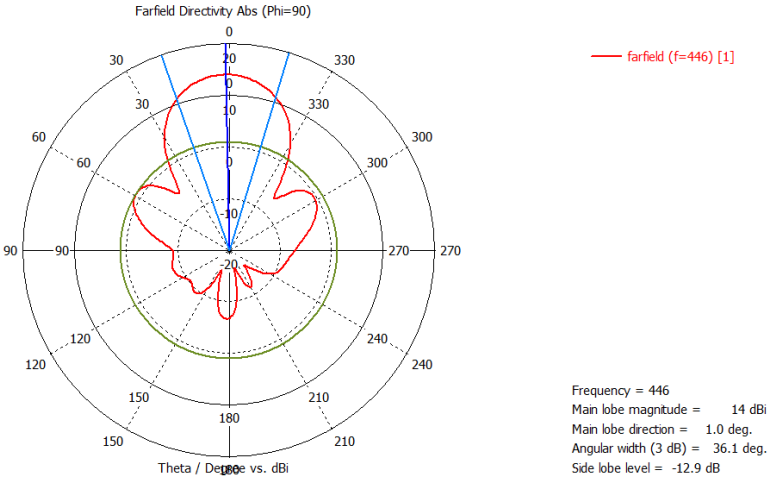


Рис. 2. Диаграмма направленности антенны

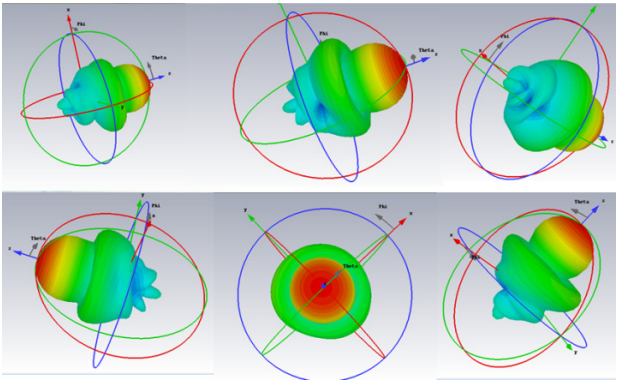


Рис. 3. 3D-изображение диаграммы направленности антенны

Выводы

В представленной работе приведены расчет и моделирование спиральной цилиндрической антенны. Показаны результаты 3D-моделирования. При оптимальных параметрах антенна позволяет получить усиление до 14 дБи. Эти результаты удовлетворяют параметрам, выбранным для системы «Наземная станция» – «Спутник». Полученный резерв по мощности передаваемого сигнала составил 3,15 дБ [2].

Список литературы

1. Обзор миссий некоторых университетских спутников / В. Н. Белослудцев, Е. С. Бояринцева, А. В. Драчев, С. А. Рылов, В. Н. Широбоков, В. А. Глушков, К. А. Богатырев, С. А. Широких // Приборостроение в XXI веке – 2016 : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 26–32.

2. *Скляр, Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.

3. *Гончаренко, И. В.* Антенны КВ и УКВ. – М. : РадиоСофт : Журн. «Радио», 2004. – 128 с.

4. *Марков, Г. Т.* Антенны : учеб. для студ. радиотехн. специальностей вузов / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975. – 528 с.

5. *Томаси, У.* Электронные системы связи. – М. : Техносфера, 2007. – 1360 с.

E. S. Boyarintseva, magister student
E-mail: bettykb@yandex.ru
A. V. Drachev, magister student
S. A. Rylov, magister student
G. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
E-mail: vladimir.glushkov@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Engineering Analysis and Simulation of a Helical Antenna Aimed at Low-Orbit Satellite Communication Performed by Means of CST Microwave Studio

This article presents the results of calculation and simulation of a spiral antenna for communication with a low-orbit satellite. The simulation was performed using the CST Microwave Studio software. The developed antenna corresponds to the selected performance indicators of the ground station.

Keywords: spiral antenna, radiation pattern, low earth orbit, ground station, simulation.

УДК 004.054

А. В. Гаврилов, Т. А. Шумилова, Д. С. Яшина, студенты
E-mail: anton_gavrilov.1997@mail.ru
В. А. Глушков, канд. тех. наук, доц., зав. кафедрой
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ онлайн-сервисов, предназначенных для схемотехнического моделирования электрических схем, и сравнение их с OrCAD

Статья посвящена обзору онлайн-сервисов, являющихся альтернативой программному пакету схемотехнического моделирования OrCAD. В ней приведены описание ныне существующих сервисов, построение в них входных и выходных ВАХ биполярного транзистора (БПТ), включенного по схеме с общим эмиттером (ОЭ), а также комментарии пользователей об особенностях отдельных сервисов.

Ключевые слова: OrCAD, онлайн-сервисы схемотехнического моделирования, БПТ, *h*-параметры.

© Гаврилов А. В., Шумилова Т. А., Яшина Д. С., Глушков В. А., 2018

Введение

В наше время облачные сервисы приобретают все большую популярность. Это связано с тем, что они не предъявляют жестких требований к операционной системе и самой вычислительной машине. Более того, технологии облачных сервисов позволяют получить доступ к своей работе и/или информации в любой точке земного шара при наличии выхода в сеть Интернет.

Поэтому была поставлена цель найти онлайн-сервисы, предназначенные для моделирования электрических цепей, и сравнить их с программой OrCAD, которая является одним из самых авторитетных инструментов в данной сфере.

Постановка задачи

Для проведения сравнительного анализа будет решаться одна и та же задача – анализ статических характеристик БПТ, включенного по схеме ОЭ, и оценка *h*-параметров в рабочей точке. Данная задача будет решаться как в рассматриваемых онлайн-сервисах, так и в программе OrCAD.

Содержательная часть

OrCAD. Получение входных и выходных ВАХ, расчет h-параметров

В среде OrCAD были составлены электрические схемы для получения входных и выходных вольтамперных характеристик транзистора. На рис. 1 изображена схема для исследования входных ВАХ.

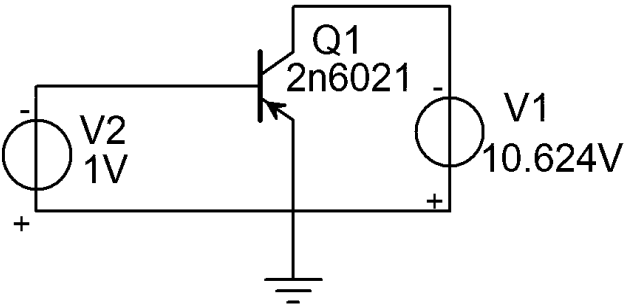


Рис. 1. Схема для получения входных ВАХ

На рис. 2 изображена входная ВАХ.

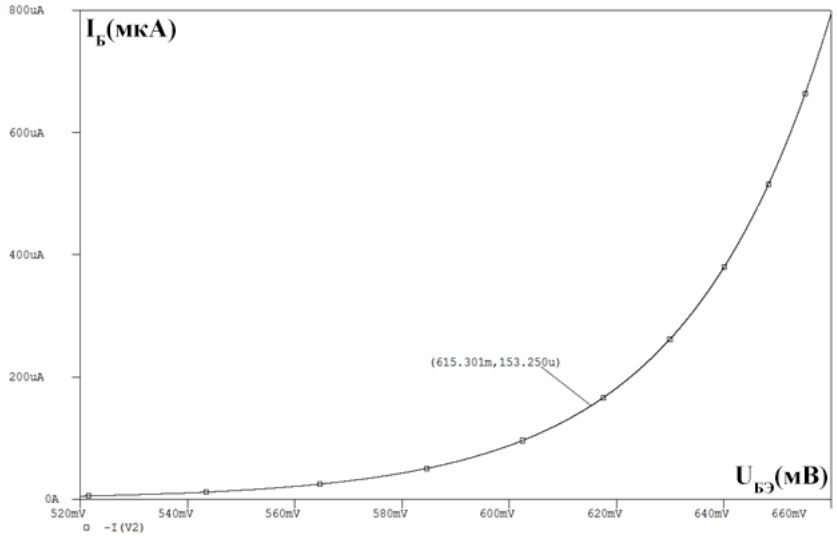


Рис. 2. Входная ВАХ

В рабочей точке ток базы принимает значение $I_{Б0}$ = 0,15 мА, а напряжение между базой и эмиттером $U_{БЭ0}$ = 615,3 мВ.

На рис. 3 изображена схема для исследования выходных ВАХ.

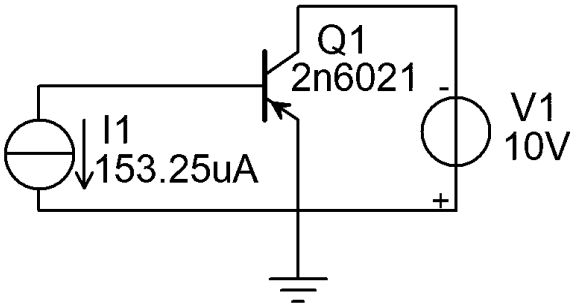


Рис. 3. Схема для исследования выходных ВАХ

На рис. 4 изображена выходная ВАХ.

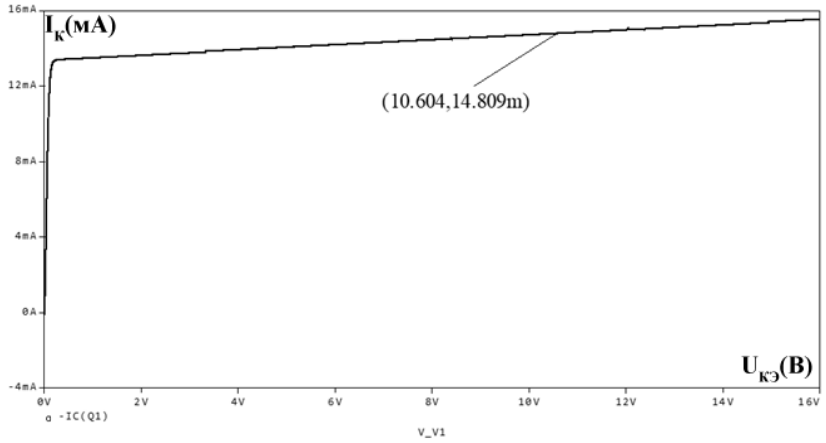


Рис. 4. Выходная ВАХ

Ток коллектора в рабочей точке равен $I_{К0} = 0{,}15$ мА, а напряжение между коллектором и эмиттером $U_{КЭ0} = 10{,}6$ В.

По вольтамперным характеристикам вычисляются *h*-параметры:

$$h_{11.Э} = r_{вх.Э} = \frac{\Delta U_{БЭ0}}{\Delta I_{Б0}} = \frac{1{,}182 \cdot 10^{-3}}{6{,}541 \cdot 10^{-6}} \approx 180{,}7 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где $r_{вх.Э}$ – входное дифференциальное сопротивление, $\Delta U_{БЭ\,0}$ – приращение напряжения между базой и эмиттером вблизи рабочей точки, $\Delta I_{Б\,0}$ – приращение тока базы вблизи рабочей точки;

$$h_{12.Э} = \mu_Э = 0, \quad (2)$$

где $\mu_Э$ – коэффициент обратной связи, для схемы с общим эмиттером он равен нолю;

$$h_{21.Э} = \beta = \frac{I_{К0}}{I_{Б0}} = \frac{14{,}81 \cdot 10^{-3}}{0{,}15 \cdot 10^{-6}} \approx 98{,}7, \quad (3)$$

где β – коэффициент передачи тока, $I_{К0}$ – ток коллектора в рабочей точке, $I_{Б0}$ – ток базы в рабочей точке;

$$h_{22.Э} = g_{вых.Э} = \frac{\Delta I_{К0}}{\Delta U_{КЭ0}} = \frac{93{,}836 \cdot 10^{-6}}{697 \cdot 10^{-3}} \approx 0{,}135 \cdot 10^{-3} \text{ См}, \quad (4)$$

где $g_{\text{вых.Э}}$ – выходная дифференциальная проводимость, $\Delta U_{\text{КЭ }0}$ – приращение напряжения между коллектором и эмиттером вблизи рабочей точки, $\Delta I_{\text{К }0}$ – приращение тока коллектора вблизи рабочей точки [1];

Онлайн-сервисы, предназначенные для моделирования элекрических схем

Для рассмотрения были выбраны следующие семь сервисов [2]:

1) TINA Cloud;
2) EveryCircuit;
3) SystemVision;
4) CircuitLab;
5) DoCircuits;
6) EasyEDA;
7) PartSim.

Далее будет изучена возможность выполнения поставленной задачи с помощью данных сервисов и выявлены основные особенности работы с ними.

Сервисы, не подходящие для нашего исследования

В сервисах EveryCircuit и SystemVision отсутствует построение статических характеристик по постоянному току, а значит, использовать их для нахождения *h*-параметров невозможно. Однако SystemVision остается весьма известным сервисом для моделирования во временной и частотных областях, а EveryCircuit является простым в использовании электронным онлайн-эмулятором с удобным интерфейсом и хорошо сделанными графиками. Но бесплатная версия действует всего сутки, и существуют ограничения диапазона задания параметров элементов.

EasyEDA создан для разработки электрических схем и печатных плат. Сервис поддерживает основные виды анализа, в том числе присутствует возможность построения статических характеристик по постоянному току, и имеет большую библиотеку элементов, но по графикам, получаемым в результате, можно лишь оценить внешний вид функции и ее приблизительные значения, что затрудняет точное вычисление по ним характеристик транзистора.

Сервис без бесплатной версии

TINA Design Suite является мощным доступным пакетом программного обеспечения для анализа, проектирования и тестирования в режиме реального времени схем с аналоговыми, цифровыми компонентами, микроконтроллерами и компонентами, определенными в описаниях HDL (Hardware Description Languages), а также для проек-

тирования печатных плат макетов схем. Существует бесплатная скачиваемая версия – Tina-Ti.

CircuitLab. Получение входных и выходных ВАХ, расчет h-параметров

Сервис не является свободно распространяемым в полной мере. Время бесплатной (пробной) работы с данным сервисом крайне ограничено, оно составляет примерно 1 час, затем будет предложено выбрать тарифный план для дальнейшего продолжения моделирования. Также библиотека элементов ограничена небольшим количеством моделей, поэтому параметры БПТ были заданы вручную.

Интерфейс сервиса интуитивно понятен, что позволяет сразу же приступить к моделированию электрических схем. ВАХ транзистора несколько отличается от образцовой ВАХ, полученной при моделировании в программе OrCAD.

В рабочей точке графики принимают следующие значения: $I_{Б0}$ = 141,3 мкА, $U_{БЭ0}$ = 615,2 мВ, $I_{К0}$ = 18,9 мА, $U_{КЭ0}$ = 10,6 В.

На основании характеристик, полученных с помощью данного сервиса, были вычислены следующие значения *h*-параметров: $h_{11.Э} = r_{вх.Э}$ = 183 Ом; $h_{21.Э} = \beta$ =126,46; $h_{22.Э} = g_{вых.Э}$ = $0{,}154 \cdot 10^{-3}$ см

DoCircuits. Получение входных и выходных ВАХ, расчет h-параметров

DoCircuits – бесплатный сервис для проектирования электрических схем и моделирования их работы. В программе доступны следующие виды анализа: DC Analysis (анализ по постоянному току), Frequency Domain Analysis (анализ частотной области) и Time Domain Analysis (анализ временной области).

В процессе работы были построены входная и выходная характеристики, по которым рассчитывались параметры транзистора.

В рабочей точке графики принимают следующие значения: $I_{Б0}$ = = 0,15 мА, $U_{БЭ0}$ = 615,3 мВ, $I_{К0}$ = 0,15 мА, $U_{КЭ0}$ = 10,6 В. Результаты идентичны тем, что были получены в OrCAD. По графикам вычисляются *h*-параметры: $h_{11.Э} = r_{вх.Э}$ = 183,9 Ом; $h_{21.Э} = \beta$ = 98,7; $h_{22.Э}$ = $=g_{вых.Э}$ = $0{,}136 \cdot 10^{-3}$ см. Максимальное отклонение полученных результатов от тех, что были вычислены при помощи OrCAD, не превысило 2 %.

Однако, несмотря на удовлетворительные результаты анализа и дружественный к пользователю интерфейс, программа имеет существенные недостатки: онлайн-версия работает очень медленно и оказывает нагрузку на компьютер из-за устаревшей технологии, по которой

она построена, небольшая библиотека элементов также замедляет рабочий процесс и, судя по блогу разработчиков, сервис не обновлялся с 2014 г.

PartSim. Получение входных и выходных ВАХ, расчет h-параметров

Сервис PartSim – это абсолютно бесплатный SPICE-симулятор электрических схем. Программа позволяет проводить все базовые типы анализов: по постоянному и переменному току, во временной и частотной областях.

В ходе выполнения работы были получены выходные (рис. 5) и входные (рис. 6) ВАХ.

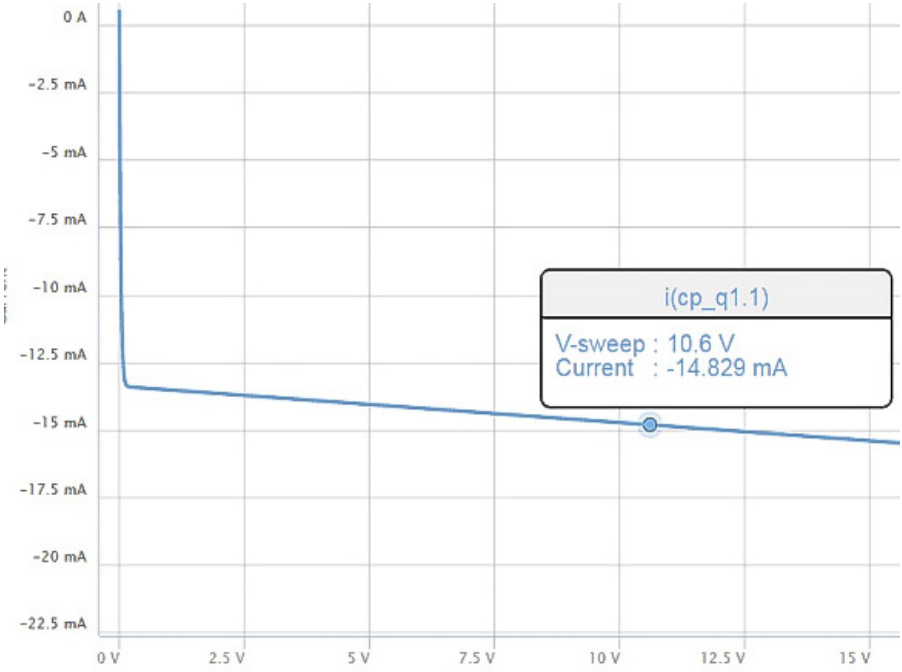


Рис. 4. Выходная ВАХ, полученная с помощью сервиса PartSim

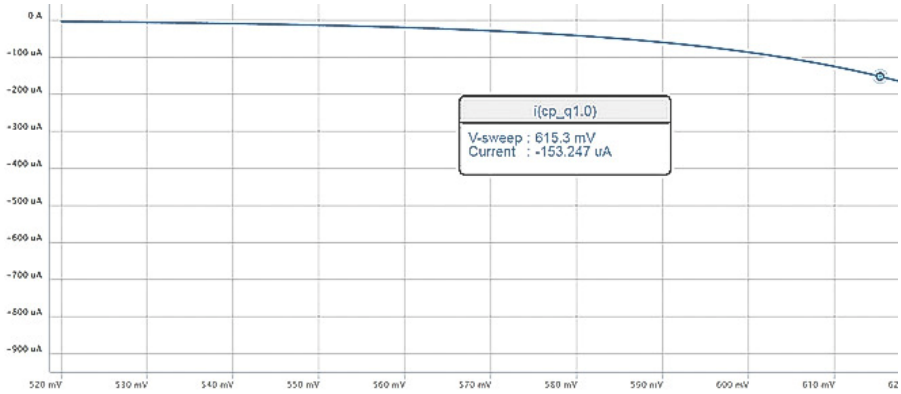


Рис. 5. Входная ВАХ, полученная с помощью сервиса PartSim

Полученные выше характеристики были использованы для расчета *h*-параметров: $h_{11.Э} = r_{вх.Э} = 180$ Ом; $h_{21.Э} = \beta = 95{,}4$; $h_{22.Э} = g_{вых.Э} = 0{,}135 \cdot 10^{-3}$ см.

Сервис обладает рядом достоинств, таких как: необязательная регистрация, возможность взаимодействия с графиками (установка маркеров), удобство задания параметров БПТ текстовой моделью.

Выводы

В ходе работы были выявлены преимущества и недостатки программ TINACloud, EveryCircuit, SystemVision, CircuitLab, DoCircuits, EasyEDA, PartSim. Из рассмотренных сервисов наиболее предпочтительным оказался сервис PartSim. Все функции для выполнения данной работы присутствуют в необходимом объеме, более того, он бесплатен и время работы не ограничено.

Список литературы

1. *Ушаков, П. А.* Осваиваем электронику с ЭВМ : учеб. пособие. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2003. – 184 с.

2. 10 лучших бесплатных онлайн-симуляторов электроцепи [Электронный ресурс] // QRZ.ru: Технический портал. – URL: http://www.qrz.ru/reference/free_circuit_simulators/ (дата обращения: 18.10.2017).

3. *Алехин, В. А.* Электротехника, электроника и схемотехника. Лабораторный практикум в облачной среде схемотехнического проектирования TINACloud. – М. : Московский технол. ун-т, 2016. – 248 с.

A. V. Gavrilov, T. A. Shumilova, D. S. Yashina, students
E-mail: anton_gavrilov.1997@mail.ru
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Analysis of Online Services Intended for Simulation of Electrical Circuits and Comparing Them with OrCAD

The article is about online services, which can be an alternative to the OrCAD – a proprietary software tool suite used primarily for electronic design automation. It describes existing services and also shows how to use them to create the plots of input and output current-voltage characteristics of a bipolar junction transistor (BJT), which has a common-emitter amplifier topology. As well as user's comments about the features of different services can be found there.

Keywords: OrCAD, circuit simulation online services, bipolar junction transistor, BJT hybrid parameters.

УДК 628.971

В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
А. В. Балашов, А. Р. Халисламова, М. В. Кислицин, студенты
E-mail: alex-alex303@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Умное городское освещение

Технология LoRa была разработана в 2015 г., но уже приобрела репутацию перспективного решения для построения LPWAN-сетей. Данная технология использует протокол канального уровня LoRaWAN. Этот открытый протокол для сетей с высокой емкостью ориентирован на передачу данных в беспроводных сенсорных сетях с большим радиусом действия, с акцентом на низкое энергопотребление и простоту конечных устройств. Данная работа посвящена ознакомлению и формированию представлений о возможностях организации связи оборудования с применением метода модуляции LoRa для разработки коммерческого проекта «Умное городское освещение».

Ключевые слова: LoRa, сети, информация, беспроводные технологии, ЛЧМ.

© В. А. Глушков, А. В. Балашов, А. Р. Халисламова, М. В. Кислицин, 2018

Введение

Одно из современных направлений в развитии технологий связи – это сверхкомпактные, экономичные модули, обеспечивающие передачу данных на большие расстояния. Основная область применения: различные датчики, управляющие устройства и прочие «умные» компоненты. LoRa как раз относится к таким технологиям связи: миниатюрный модуль, радиомодем, потребляющий минимальную энергию и делающий возможной передачу данных на расстояние в километры (вплоть до десятков километров). Особенность стандарта LoRa – это передача небольших пакетов данных с невысоким энергопотреблением. По заверениям производителя, дальность на открытом воздухе может достигать 10 км, а время работы от батареи может составлять несколько лет. Рабочие частоты зависят от страны и составляют 433 или 868 МГц (EU-версия) или 915 МГц (USA-версия).

На сегодняшний день потенциал технологии сетей дальнего радиуса действия с низким энергопотреблением остается не раскрыт до конца, особенно в России. Среди заказчиков появился серьезный интерес к технологиям IoT-связи для реализации своих масштабных проектов, именно это актуализирует задачу, поставленную в данной статье: изучение технологии LoRa, освоение принципов ее работы и разработка технологии практической реализации на примере умного городского освещения.

Основы технологии LoRa

В марте 2015 г. исследовательский центр IBM Research и компания Semtech представили новую технологию Энергоэффективных Сетей Дальнего Радиуса Действия – LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), которая имеет ряд преимуществ по сравнению с сотовыми сетями и Wi-Fi для обеспечения M2M-коммуникаций.

LoRa – это технология и метод модуляции, которая определяет PHY-уровень системы (физический), LoRaWAN является протоколом (MAC-уровень) для сетей с высокой емкостью, большим радиусом действия и низким энергопотреблением, разработанным организацией LoRa Alliance для сетей LPWAN [2].

LoRaWAN – это открытый протокол для сетей, в которых:

1) высокая емкость (до 1 М устройств в одной сети);
2) большой радиус действия (до 10–15 км на открытой местности);
3) низкое энергопотребление.

В течение многих лет огромный потенциал интернета вещей (IoT) сдерживался техническими проблемами, такими как малый срок служ-

бы устройств, работающих от батарей, короткая дальность связи, высокая стоимость и отсутствие единых стандартов.

LoRaWAN (Long Range Wide-Area Networks) позволила преодолеть все эти препятствия. На основе новой спецификации и нового протокола для LPWAN (в пер. – низкая мощность широкополосной сети), использующего нелицензируемый диапазон частот, технология LoRaWAN позволила подключать датчики на большие расстояния, предлагая при этом оптимальное время автономной работы датчиков и минимальные требования к инфраструктуре [1].

LoRa – проприетарный протокол, использующий линейную частотную модуляцию (ЛЧМ). ЛЧМ хорошо известна в радиолокации, а вот в качестве основы кодирования в цифровых радиоканалах использовалась реже. LoRa работает на высоких частотах, а все замечательные характеристики происходят не только из используемого метода кодирования, но и из того, что приемник в LoRa очень «вычислительный», что позволяет достичь огромной практической чувствительности. Однако в полном соответствии с физическими принципами передачи информации скорость передачи оказывается небольшой. Протокол позиционируют как решение для интернета вещей, где «дешевый» (в смысле затрат энергии и объема устройства) обмен командами и небольшими порциями данных на существенных расстояниях представляет собой насущную задачу. Можно придумать и другие замечательные применения вроде децентрализованных Mesh-сетей, обеспечивающих обмен сообщениями в условиях различных кризисов, – LoRa здесь подходит просто идеально.

Линейная частотная модуляция означает, что частота сигнала линейно изменяется со временем, от начального значения f_0 (может браться где угодно) до конечного значения f_1. Частота может изменяться как в сторону повышения, так и в сторону уменьшения. Разность частот f_0 и f_1 определяет ширину канала. Традиционные значения BW – 125, 250, 500 кГц. Современные модемы LoRa поддерживают и более узкие полосы, вплоть до 7,8 кГц. Отдельный сигнал, заданный на всей полосе частот канала, называют «*чирпом*» (*chirp*).

Модуляция LoRa обладает высокой устойчивостью к помехам. Это широкополосный сигнал, к тому же растянутый (в смысле кодирования) по времени, это полностью исключает влияние узкополосных импульсных помех, а также позволяет принимать сигнал, находящийся глубоко под действующим уровнем шума [4].

Архитектура LoRaWAN сетей

Протокол LoRaWAN обеспечивает полную двухстороннюю связь между узлами сети и обладает специальными методами шифрования для обеспечения надежности и безопасности системы. Типовую сеть LoRaWAN можно представить в виде оконечных устройств (точек, узлов), данные с которых передаются (в зашифрованном виде) на шлюзы, далее на сервер сети провайдера, а после на сервер приложений провайдера, откуда все это уже поступает к конечному пользователю [2].

В LoRaWAN сети шлюзы также называют концентраторами, конечные устройства – точками или узлами (рис. 1).

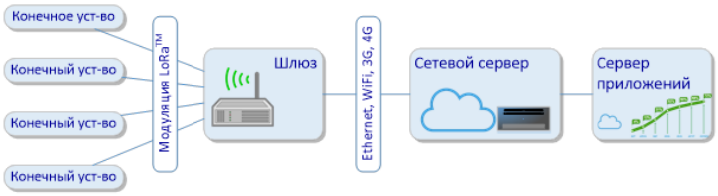


Рис. 1. Архитектура сети LoRaWAN

В конечном итоге LoRaWAN-сеть имеет топологию звезда из звёзд, куда входят конечные узлы, которые через шлюзы, образующие прозрачные мосты, общаются с центральным сервером сети. При таком подходе обычно предполагается, что шлюзами и центральным сервером владеет оператор сети, а конечными узлами – абоненты. Абоненты имеют возможность прозрачной двунаправленной и защищенной передачи данных до конечных узлов.

Узлы сети LoRaWAN имеют питание от АКБ или батарей и могут выполнять различные функции, такие как: измерения, управление и контроль. При помощи протокола LoRaWAN эти узлы/точки настраиваются для связи со шлюзом/концентратором LoRa.

Узлы работают в режиме передачи лишь краткие промежутки времени, далее открывается временное окно на прием данных. Остальное время узлы находятся либо в спящем состоянии, либо в состоянии приема, которое зависит от класса устройства (A, B или C) [3].

Практическая реализация. «Умное городское освещение»

Направление технологии сетей дальнего радиуса действия с низким энергопотреблением является очень актуальным в наши дни и позволяет решить множество проблем, связанных с интернетом вещей,

можно отметить наиболее перспективные области внедрения LoRa-устройств:

1. Энергетика.
2. Транспорт.
3. ЖКХ.
4. Популярная некогда концепция «умного дома» сменилась идеей «умного города», когда все устройства города соединяются между собой.

Именно концепция «умного города» представляет собой больший интерес для коммерческих организаций. Одна из таких организаций предоставила нам возможность принять участие в разобработке подобного проекта с применением модуляции LoRa. Рассмотрев концепцию под названием «Умное городское освещение», как часть целой системы, нами был сформирован принцип работы данной технологии, предоставленный ниже, он включает в себя все элементы архитектуры LoRa WAN сетей.

На рис. 2 изображена упрощенная схема работы умного освещения. Датчики с модулем LoRa установлены на фонарных столбах города. Они работают совершенно автономно, используя информацию об освещенности и о движении, и регулируют работу ламп, снижая уровень светимости на 90 % при определенных условиях. При помощи модуля LoRa возможно отправление об отчетах работы и затратах энергии. По радиоканалам на частоте 868 МГц система может передавать и получать информацию через шлюзы на сервер. С сервера в свою очередь оператор может просматривать получаемые данные и удаленно управлять процессами, в случае необходимости также может проходить мониторинг всей системы, то есть определение ее работоспособности.



Рис. 2. Структура умного городского освещения

Благодаря своей дальности технология LoRa позволяет установить несколько шлюзов в районах города, которые будут передавать данные на единственный сервер, что значительно облегачает инфраструктуру, а благодаря тому что данные с датчиков до шлюзов передаются по нелицензируемым частотам, снижаются финасовые затраты, что в совокупности дает значительную экономическую выгоду, а также прозрачную и работоспособную систему управления светом во всем городе, которая может работать автономно в течение нескольких лет.

Таким образом, изучив различные источники о технологии LoRaWAN, были выявилены плюсы и минусы данной системы.

Плюсы:

– LoRaWAN – глобальная сеть, что тебует особого внимания к безопасности и конфиденциальности передаваемых данных, которые обеспечиваются шифрованием AES на нескольких уровнях симметричным алгоритмом блочного шифрования;

– LoRa использует нелицензируемый частотный диапазон, что упрощает возможности ее использования и реализации, в силу того что не требует специальных разрешений;

– высокая дальность радиосигнала;

– сверхнизкое энергопотребление (200 нА – режим ожидания, 11 мА – режим приема, 40 мА – режим передачи);

– двунаправленность связи.

Минусы:

– на заявленных расстояниях типичные скорости для LoRa измеряются в лучшем случае десятками байтов, что говорит об ограниченности использования технологии;

– можно отнести к минусам то, что LoRa – это проприетарный протокол, что косвенно влияет на ее цену;

– к сожалению, если постараться, то все же можно создать ощутимые помехи, что говорит о незащищености сети от недоброжелателей. Но это весьма сложно осуществить.

Заключение

Устройства стандарта LoRa представляют собой удобное и готовое решение для низкоскоростной передачи малых объемов данных на относительно большие (вплоть до нескольких километров) расстояния. Устройства LoRa оптимизированы под низкое энергопотребление, что позволяет использовать их с питанием от батарей или аккумуляторов (однако платой за это является низкая скорость передачи

данных). Многие сейчас сильно воодушевлены возможностями «глобальных» сетей LoraWAN, которые позволяют решить большинство проблем, связанных с интернетом вещей.

Список литературы

1. LoRaWAN™ [Электронный ресурс] // lora-alliance. – URL: https://www.lora-alliance.org/technology (дата обращения: 20.11.2017).

2. «Кто же такая эта LoRa?» или краткий обзор протокола LoRaWAN [Электронный ресурс] // Russian IoT: Интернет вещей по-русски. – URL: https://r-iot.org/2016/06/11/кто-же-такая-эта-lora-или-краткий-обзор-пр/ (дата обращения: 10.11.2017).

3. Обзор технологии LoRa [Электронный ресурс] // iTech: Технологии связи. – URL: https://itechinfo.ru/content/обзор-технологии-lora (дата обращения: 10.11.2017).

4. *Веденюхин, А*. Беспроводная технология малой мощности LoRa и модули NiceRF SX1276 [Электронный ресурс] // dxdt.ru: занимательный интернет-журнал. – URL: https://dxdt.ru/2016/07/01/7996/ (дата обращения: 10.11.2017).

V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
A. V. Balashov, A. R. Halislamova, M. V. Kislitsin, students
E-mail: alex-alex303@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Smart Urban Lighting

LoRa technology has been invented in 2015, and since then it has already acquired a reputation as a promising solution for building LPWAN networks. This technology uses the channel level protocol LoRaWAN. This high capacity networks open protocol is aimed at data transmission in wireless sensor networks with large working ranges. The particulat focus of the protocol is low power consumption and simplicity of end devices. The present article overviews the variants of connection of numerous pieces of equipment by means of the LoRa modulation method, with the focus to develop "Smart urban lighting" commercial project.

Keywords: LoRa, network, information, wireless technologies, linear frequency modulation.

УДК 621.311.69

В. Г. Гравшин, студент
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Модель водородного топливного элемента в системе компьютерного моделирования Matlab

Статья содержит ознакомительную информацию о модели водородного топливного элемента с протонно-обменной мембраной в системе автоматизированного проектирования Matlab.

Ключевые слова: топливный элемент, моделирование, Matlab, Simulink.

Введение

В настоящее время тема топливных элементов затрагивается довольно часто. И это не удивительно, с приходом этой технологии в мир электроники она обрела новое рождение. Мировые лидеры в области микроэлектроники наперегонки представляют прототипы своих будущих продуктов, в которых будут интегрированы собственные мини электростанции [4]. Но чтобы создать что-то новое или модифицировать то, что уже создано, необходимо проводить эксперименты. И для того чтобы ускорить этот процесс, создаются модели этих устройств в различных системах автоматизированного проектирования.

Поскольку данные технологии стали интенсивно развиваться относительно недавно, найти действительно стоящую рабочую модель очень сложно. Поэтому в данной статье представлено описание рабочей модели водородного топливного элемента в системе автоматизированного проектирования Matlab, а именно в интегрированном пакете Simulink. Описание данной модели в САПР представлено на английском языке, и найти руссифицированный вариант крайне проблематично. Данный пробел заполняется настоящей статьей.

Сведения из теории

Чтобы открыть модель топливного элемента, необходимо зайти в Matlab и в рабочем поле вписать команду *power_fuel_cell* [7, 8], за этим последует запуск пакета Simulink и открытие нужной модели (рис. 1).

© Гравшин В. Г., Глушков В. А., 2018

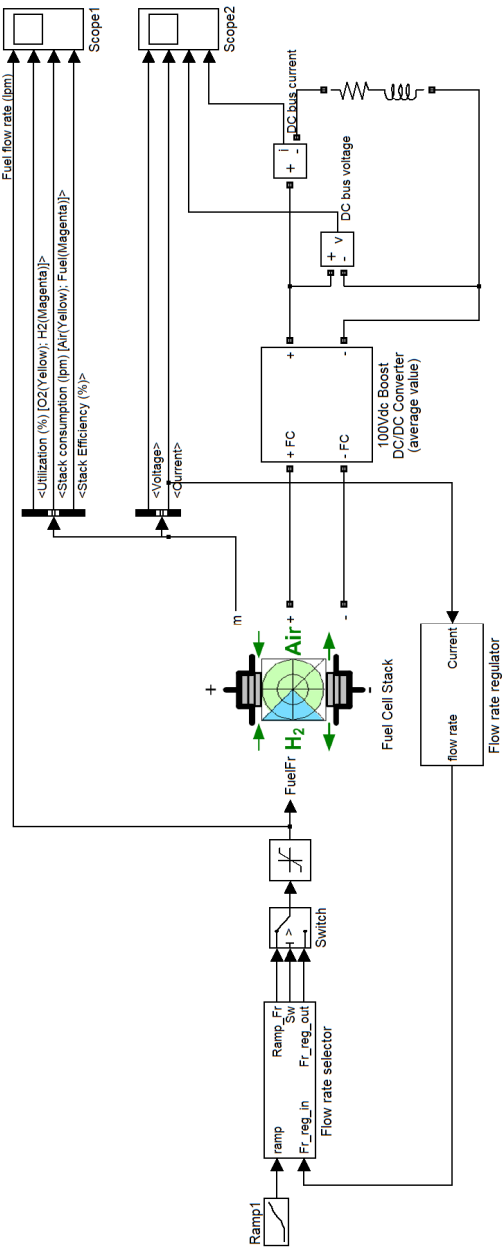


Рис. 1. Модель водородного топливного элемента с протонно-обменной мембраной в среде Matlab/Simulink (Fuel Cell Stack – батарея топливных элементов, Flow rate regulator – регулятор расхода продуктов, Flow rate selector – переключатель типа расхода продуктов, DC/DC Converter – преобразователь постоянного тока, Scope – визуализатор данных, DC bus voltage – шина постоянного напряжения, DC bus current – шина постоянного тока)

Основным элементом модели является блок под названием Fuel Cell Stack, все остальные элементы обеспечивают управление величинами (объем, состав, давление) продуктов, поступающих в топливный элемент, и формирование графиков, отображающих выходные величины (сила тока, напряжение, КПД) [2].

Рассмотрим возможности, которые предоставляет пользователям основной элемент модели. Свойства элемента отображаются в следующем окне (рис. 2)

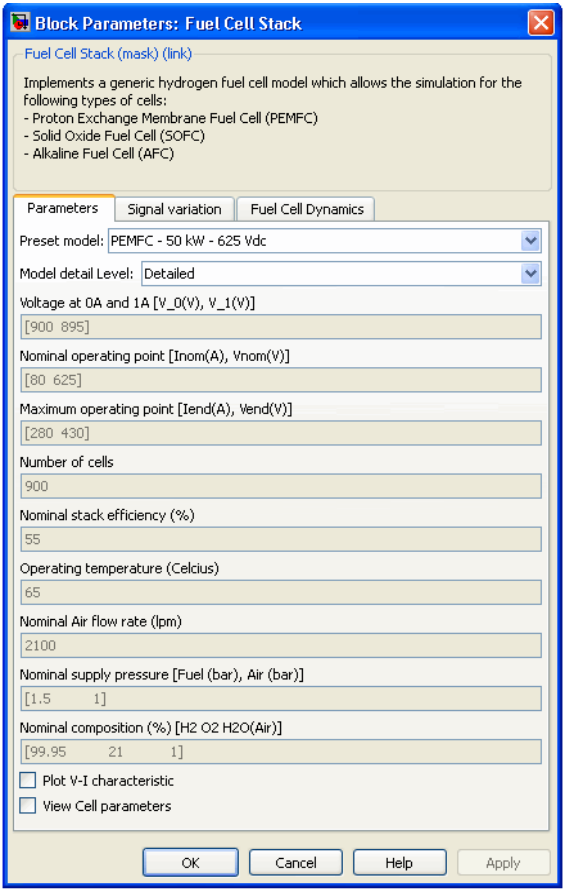


Рис. 2. Окно параметров элемента Fuel Cell Stack

В данном окне можно выбрать тип топливного элемента: топливный элемент с протонно-обменной мембраной, твердотельный оксидный топливный элемент или щелочной топливный элемент. В следующей строке можно определить уровень детализации модели: упрощенный или детализированный. В зависимости от выбранного уровня эквивалентная схема элемента Fuel Cell Stack будет меняться.

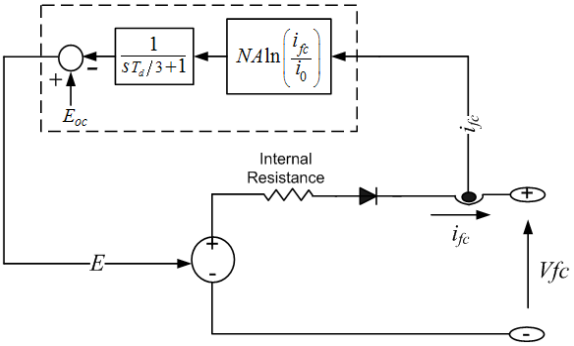


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема элемента Fuel Cell Stack (формулы обеспечивают расчет энергии, выделяемой топилвным элементом, при заданных входных параметрах)

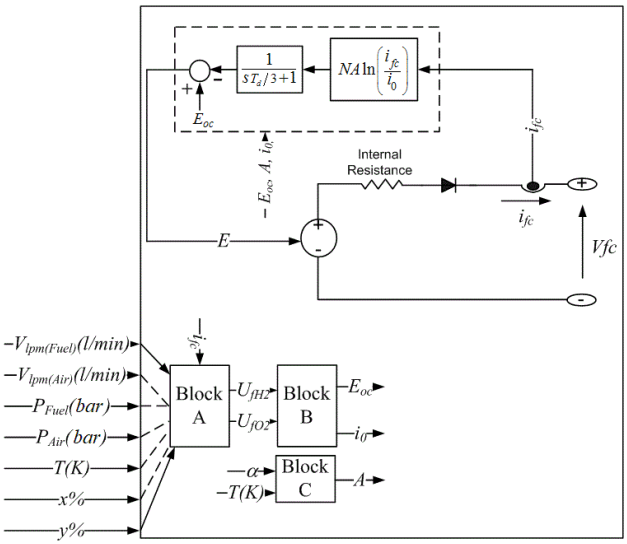


Рис. 4. Детализированная эквивалентная схема элемента Fuel Cell Stack: U_{fH2} и U_{fO2} – коэффициенты использования водорода и кислорода, i_{fc} – ток топливного элемента, T_d – время отклика, α – коэффициент переноса заряда, S – коэффициент, зависящий от типа топливного элемента

Основным отличием этих схем является то, что в детализированной параметры E_{oc} (напряжение разомкнутой цепи), i_0 (ток обмена) и A (коэффициент Тафеля) обновляются в режиме онлайн, то есть в процессе проведения имитационного моделирования.

Помимо этого в окне параметров элемента, в зависимости от выбранного уровня, можно устанавливать напряжение батареи топливных элементов (V_{fc}, B), номинальную рабочую точку (I_{nom}, A; U_{nom}, B), максимальную рабочую точку (I_{end}, A; U_{end}, B) [5], количество топливных элементов в батарее (N), номинальную эффективность батареи (E, %), рабочую температуру (T, K), номинальный расход воздуха ($V_{lpm(Air)}$, л/мин), номинальное давление подачи (P_{Fuel}, Бар; P_{Air}, Бар) и номинальный состав продуктов (x, %; y, %).

Вторая вкладка в окне настроек элемента Fuel Cell Stack доступна только для детализированной модели. Она называется «Изменение сигнала» (рис. 5).

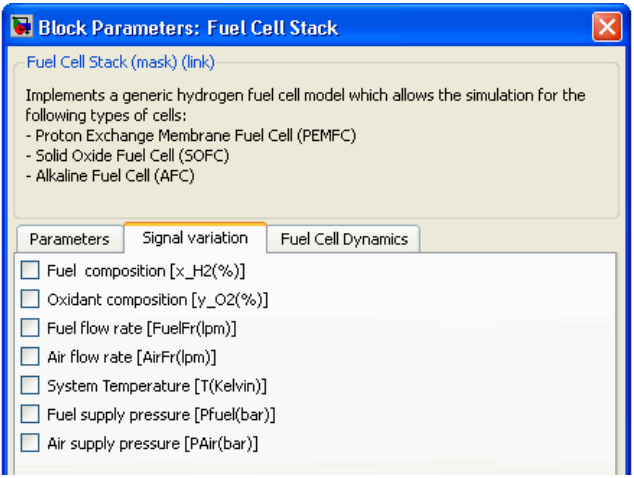


Рис. 5. Вкладка «Изменение сигнала»

Данная вкладка позволяет задавать нужный состав топлива (процент водорода, содержащегося в нем), состав окислителя (процент кислорода, содержащегося в нем), расход топлива и расход воздуха (в литрах в минуту), температуру системы (в Кельвинах), давление подачи топлива и давление подачи воздуха (в барах). Это осуществляется путем подачи постоянного знчения либо некоторой функциональной

зависимости на нужный вход, который появляется на элементе после его включения в данной вкладке [1].

Третья, и последняя, вкладка в окне настроек элемента Fuel Cell Stack позволяет активировать динамику поведения топливного элемента (рис. 6).

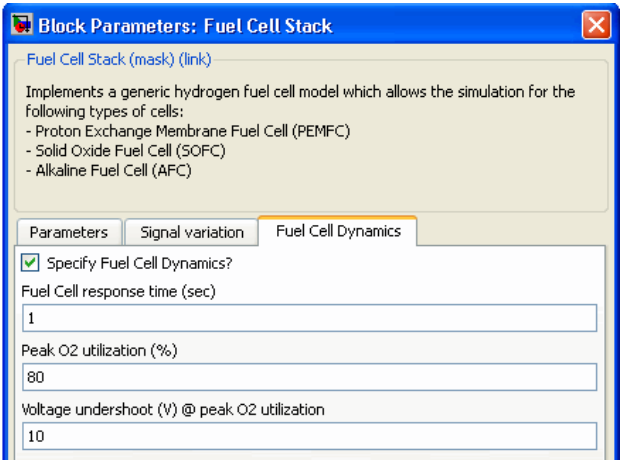


Рис. 6. Вкладка «Динамика топливного элемента»

В ней пользователь может задать время реакции топливного элемента (в секундах) [3], пиковое значение потребления кислорода (в процентах), а также максимальное значение провала напряжения при пиковом потреблении кислорода (в вольтах) [6].

Кроме того, модель имеет свои особенности. Она обладает рядом допущений:

– газы считаются идеальными;

– в батарею подаются только водород и воздух;

– батарея снабжена системой охлаждения, которая поддерживает температуру на катоде и на аноде стабильной и равной температуре батареи;

– батарея снабжена системой управления водой для поддержания влажности внутри элемента на соответствующем уровне при любой нагрузке;

– падения давления по каналам потока незначительны;

– сопротивление ячейки является постоянным при любых условиях эксплуатации.

Ограничения также имеют место быть:

– динамика химических реакций, вызванная изменениями парциального давления химических веществ внутри элемента, не учитывается;

– выходная мощность батареи ограничена расходами топлива и воздуха;

– влияние температуры и влажности мембраны на внутреннее сопротивление не учитывается;

– поток газов или воды через мембрану не учитывается.

Заключение

Путем создания различных схем с использованием элемента Fuel Cell Stack, как было показано на рис. 1, можно получить большой набор экспериментальных моделей, способных дать необходимую информацию для разработки более совершенных систем, что в десятки раз ускоряет развитие топливных элементов, которые уже сегодня составляют серьезную конкуренцию традиционным источникам энергии.

Список литературы

1. *Outeiro, M.* MatLab/Simulink as design tool of PEM Fuel Cells as electrical generation systems [Электронный ресурс] / M. Outeiro, A. Carvalho // European Fuel Cell Forum 2011 (28 June – 1 July 2011, Lucerne, Switzerland), A1408. – Pp. 1–9. – URL: https://web.fe.up.pt/~mto/page10/files/EFCF_Lucerne_2011.pdf (дата обращения: 5.11.2017).

2. *Лазарев, Ю.* Моделирование процессов и систем в MATLAB : учеб. курс. – СПб. : Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.

3. *Юсти, Э.* Топливные элементы / Э. Юсти, А. Винзель. – М. : Мир, 1964. – 480 с.

4. *Глушков, В. А.* Обзор метанольных топливных элементов / В. А. Глушков, В. Г. Гравшин // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – 716 с.

5. *Гравшин, В. Г.* Анализ вольт-амперной характеристики топливного элемента / В. Г. Гравшин, Д. С. Перевозчикова, В. А. Глушков // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : тез. докл. Второй Всерос. молодежной науч. конф. / под ред. Д. Ю. Муромцева и [др]. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2017. – 256 с.

6. *Галлямов М. О., Хохлов А. Р.* Топливные элементы с полимерной мембраной : материалы к курсу по основам топливных элементов / М. О. Галлямов, А. Р. Хохлов. – М. : Физич. фак. МГУ, 2014. – 72 с.

7. 6 kW 45 Vdc Fuel Cell Stack [Электронный ресурс] // MathWorks. – URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/6-kw-45-vdc-fuel-cell-stack.html (дата обращения: 5.11.2017).

8. Fuel Cell Stack [Электронный ресурс] // MathWorks. – URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html?searchHighlight=fuel%20cell&s_tid=doc_srchtitle (дата обращения: 5.11.2017).

V. G. Gravshin, magister student
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Matlab Hydrogen Fuel Cell Model

The paper performs an overwiev of the hydrogen proton-exchange membrane fuel cell integrated into Matlab computer modeling and simulation environment.

Keywords: fuel cell, modeling, simulation, Matlab, Simulink.

УДК 004.046

Е. О. Данилов, ст. преподаватель
Р. Д. Хабибуллин, К. А. Зорин, студенты
E-mail: danzheol@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование методов для распознавания и воспроизведения текста

На сегодняшний день в связи с частыми контактами молодежи с компьютерами, смартфонами и прочей высокотехнологической техникой достаточно остро встает проблема упадка интереса молодежи к ним как к техническому устройству, а соответственно и к электротехническим специальностям. Для повышения интереса молодежи была сделана попытка создания алгоритма работы робота, который мог бы презентовать ту или иную специальность, что повысило бы интерес молодежи к данным профессиям. Результатом научных изысканий явилось создание трех алгоритмов для распознавания и воспроизведения текста.

© Данилов Е. О., Хабибуллин Р. Д., Зорин К. А., 2018

Ключевые слова: распознавание, воспроизведение, программный алгоритм, метрика,QR-код.

Введение

В современном мире уже в раннем возрасте дети контактируют со всевозможными высокотехнологичными гаджетами. В начальных классах у большого числа учащихся имеется смартфон, который в основном используется для развлечений. Поэтому к старшим классам у детей пропадает всякий интерес к технике, моделированию, программированию, радиолюбительству. Вся современная техника воспринимается ими как должное, как модный аксессуар и не подталкивает к расширению своих знаний, умений, к постижению нового.

Постановка задачи

Данный подход предполагает лишь потребительский интерес и совершенно исключает интерес как к сложному техническому устройству. Это одна из основных причин, по нашему мнению, из-за которой наблюдается малый интерес к электротехническим специальностям и их низкая престижность среди молодежи. Все вышесказанное привело к вопросу: «Как повысить интерес и престиж данных профессий?»

С целью увеличения интереса у учащихся старших классов и выпускников школ к электротехническим специальностям и повышения их престижа было принято решение о создании робота, который мог бы презентовать ту или иную специальность, вызывал бы интерес к предмету и давал понять, что при должном старании и терпении они смогут воплощать в реальность подобные идеи и даже большее.

Проработка концепций

Первым шагом будет разбор и проработка концепций считывания информации с экрана и воспроизведение содержания презентации.

1. Распознавание с помощью метрик.

Самый продвинутый на данный момент алгоритм (рис. 1), позволяющий непосредственно из изображения выделить текст или картинку и преобразовать в файл, который может быть воспроизведен голосовыми помощниками (например, Алиса), имеющими возможность имитировать живую речь.

Метрика – условное значение функции, задающее положение объекта в пространстве. То есть если два объекта расположены близко, то их метрики одинаковы или максимально похожи. Для данного алгоритма за основу была выбрана метрика Хемминга. Метрика Хемминга показывает, насколько объекты не похожи друг на друга.

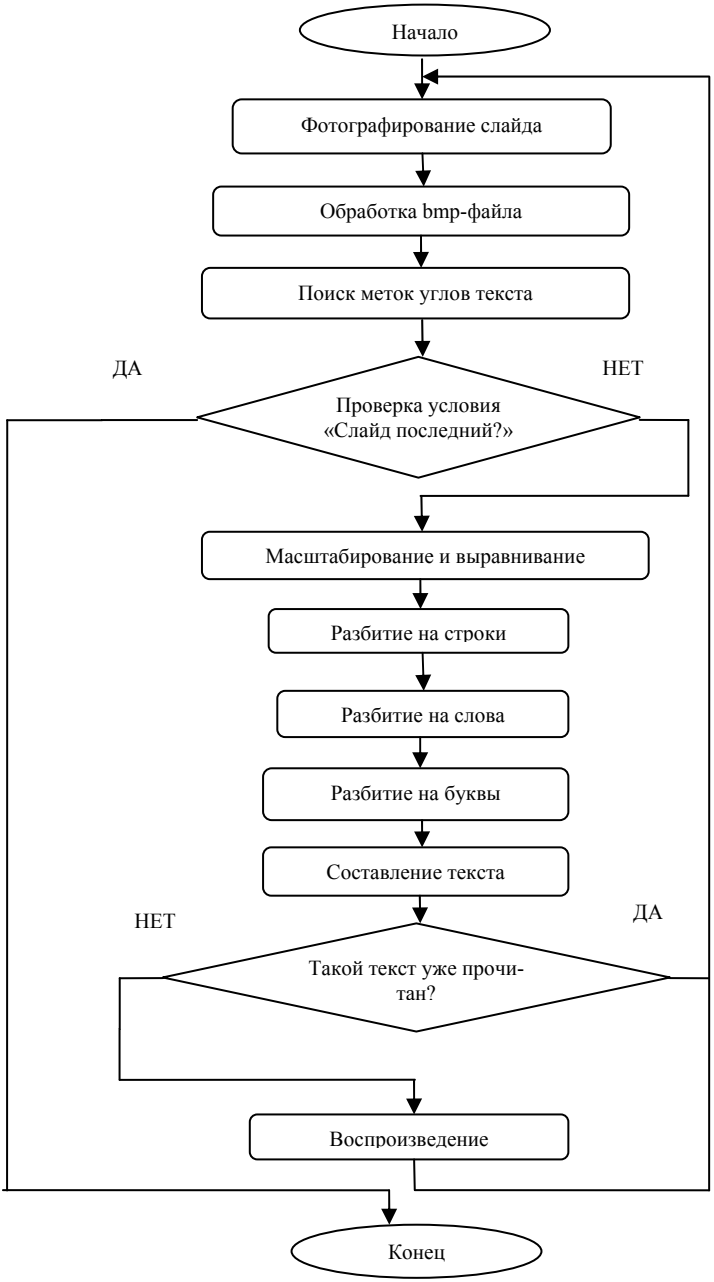


Рис. 1. Блок-схема работы алгоритма распознавания с помощью метрик

Но для метода распознавания с помощью метрик они были адаптированы, а именно все буквы разделены на классы. Для определения того, какая именно буква изображена, необходимо ее метрику сравнить с готовыми шаблонами.

Вначале цифровая видеокамера производит снимок рабочего поля. Это нужно для преобразования визуальной информации в двоичный код. Далее обработка снимка формата bitmap. Файл формата bitmap разбит на четыре основных раздела: заголовок файла растровой графики, информационный заголовок растрового массива, таблица цветов и собственно данные растрового массива. Нам нужны данные растрового массива для определения цвета пикселей.

После этого производим поиск меток углов текста. Если метки особого цвета, то это значит, что слайд последний и, значит, можно выключаться. Среди данных растрового массива при помощи меток находим нужные нам пиксели, производим масштабирование и выравнивание, для того чтобы упростить работу алгоритма и минимизировать количество ошибок. Затем разбиваем весь текст на строки, столбцы, буквы, а именно ищем «белые» промежутки, сначала большие (межстрочное расстояние), затем поменьше (расстояние между словами) и еще меньше (расстояние между буквами). Выделив отдельные буквы, получаем для них метрики и производим их сравнение с заданными шаблонами. На данном этапе мы получаем уже готовый текст. Далее, если такой текст уже был прочитан, переходим в начало, если же нет, то воспроизводим его при помощи голосового помощника. Это условие необходимо для того, чтобы не было повторного прочтения одного и того же текста.

2. QR-код, в котором закодирован сам текст (рис. 2).

Аналогично первому алгоритму производим фотографирование, обработку bmp-файла и определение корректирующих знаков. Далее производим считывание QR-кода, полученного из файла bmp. Сам QR-код пишется специально под каждый текст (слайд). Удостоверяемся, что слайд не последний. Это необходимо для прекращения работы программы. Считываем текст из QR-кода, убеждаемся, что текст не прочитан, и воспроизводим его при помощи голосового помощника.

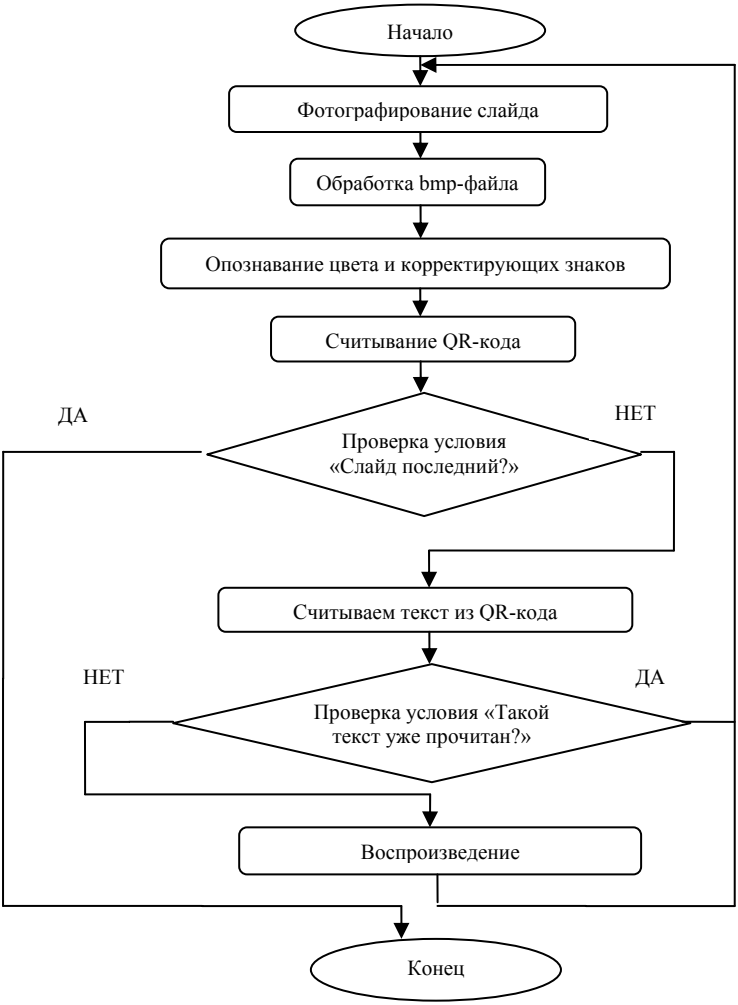


Рис. 2. Блок-схема работы алгоритма считывания текста из QR-кода

3. QR-код, в котором закодирована ссылка на аудиофайл (рис. 3).

В отличие от алгоритма считывания текста из QR-кода, в данном методе текст уже записан в виде аудиозаписи в памяти робота и его необходимо воспроизвести, перейдя по ссылке, записанной в QR-код.

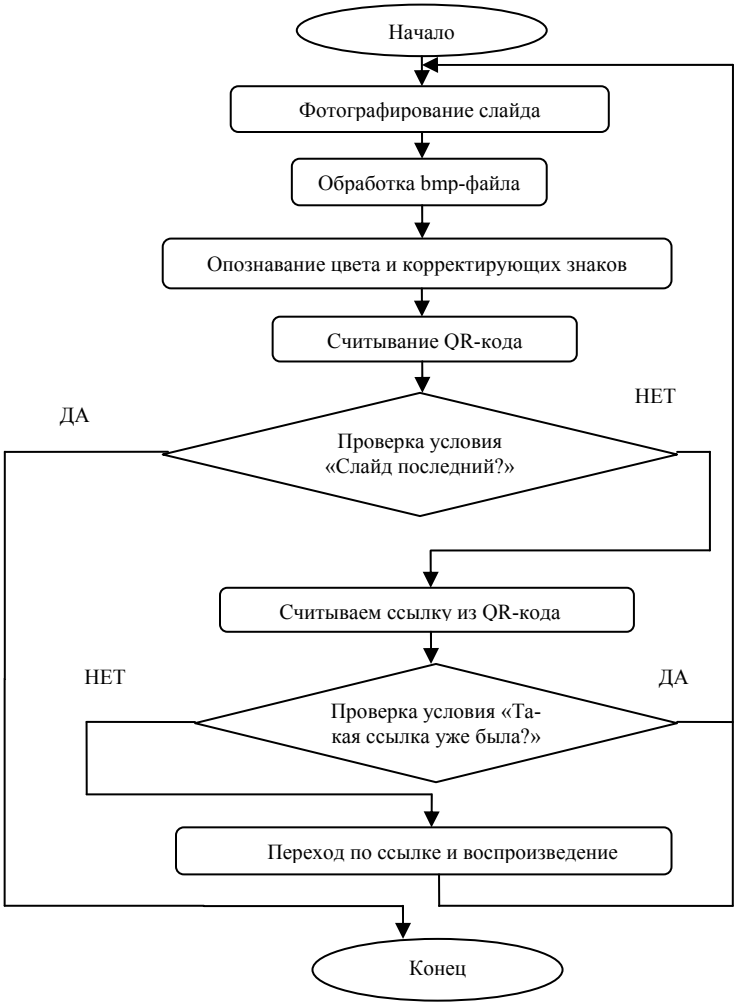


Рис. 3. Блок-схема работы алгоритма считывания QR-кода со ссылкой на аудиофайл

Выводы

Из всего описанного выше можно сделать следующие выводы касательно каждого из методов.

1. Метод распознавания с помощью метрик хорош в условиях, когда ситуация резко может измениться и необходимо срочно изменить

текст, который будет озвучен. Метод имеет высокую точность воспроизведения при условии, что используется один шрифт и мероприятие не будет сорвано из-за необходимости изменять «прошивку» робота. Использование одного шрифта – большой недостаток, так как теряется возможность разнообразить презентацию и сделать ее более оригинальной. Данную проблему может решить использование нейронных сетей. Но даже без использования нейронных сетей необходима камера с высокой разрешающей способностью и процессор с высокой частотой выполняемых операций, чтобы при воспроизведении не было ошибок и запинок.

2. Метод распознавания QR-кода лишен недостатков технической реализации и вместо дорогостоящей камеры может быть использован сканер QR-кодов, у которого есть в наличии встроенное ПО для расшифровки кода, что значительно упрощает реализацию алгоритма, но, к сожалению, дальность распознавания у него оставляет желать лучшего. Этот метод также лишен мобильности предыдущего. Существует выход из данной ситуации – создание программы, меняющей QR-код в соответствии с написанным текстом автоматически.

3. Если используется метод шифровки в QR-коде ссылки на аудиофайл, мы получаем все технические преимущества, как и в предыдущем случае. Но мобильность теряется полностью, так как необходимо каждый раз подготавливать и «перешивать» аудиофайл. В качестве компенсации за отсутствие мобильности презентация получается более живой и интересной за счет того, что текст читается диктором, с правильными ударениями и интонацией.

Список литературы

1. *Павлидис, Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М. : Радио и связь, 1986. – 198 с.

2. *Арлазаров, В. Л.* Распознавание строк печатных текстов / В. Л. Арлазаров, П. А. Куратов, О. А. Славин // Методы и средства работы с документами : сб. тр. ИСА РАН. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – С. 31–51.

3. *Квасников, В. П.* Улучшение визуального качества цифрового изображения путем поэлементного преобразования / В. П. Квасников, А. В. Дзюбаненко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – С. 200–204.

4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 18004-2015. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Спецификация символики штрихового кода QR Code. – М. : Стандартинформ, 2015. – 107 с.

E. O. Danilov, senior lecturer
R. D. Habibullin, K. A. Zorin, students
E-mail: danzheol@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Methods of Researching for Text Identification and Its Playback

Nowadays, because of frequent contacts of young people with computers, smartphones and other high-tech equipment is urgent problem of declining youth interest in them as a technical device, consequently, and to electrical engineering. To increase the interest of youth, an attempt was made to create an algorithm of the robot, which could represent a particular specialty and increase the interest of young people to such professions. The result of research was the invention of 3 algorithms of recognition and reproduction of text.

Keywords: identification, playback, software algorithm, metric, QR-code.

УДК 001.51,536.12

Л. О. Долгачева, магистрант
E-mail: Lidochka_LEDY@inbox.ru
Н. Д. Баженов, магистрант
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ методов исследования температурного поля и процесса теплообмена

В статье приводится описание и анализ основных методов исследования температурного поля и процесса теплообмена. Рассматриваются четыре метода: аналитический, графический, чиселенный и экспериментальный. Также рассматривается альтернативный метод исследования температоруного поля, основанный на проведении аналогии процесса теплопроводности и электропроводности.

Ключевые слова: температурное поле, теплообмен, методы исследования, энерго-массоперенос, RC-структура.

© Долгачева Л. О., Баженов Н. Д., Глушков В. А., 2018

Введение

Работая над актуальной на сегодняшний день темой – источники возобновляемой энергии – и исследуя вопрос синтеза альтернативной энергии, невольно сталкиваешься с такими понятиями, как процесс теплообмена и температурное поле. Для того чтобы определить параметры источников тепла, время нагревания среды и другие величины до проектирования устройства, можно смоделировать процесс теплообмена, что позволяет прогнозировать температурное поле исследуемой среды.

Данная статья посвящена анализу методов исследования и расчета температурного поля и процесса теплообмена.

Сведения из теории

При расчете температурных полей можно указать четыре основные группы методов:

1) аналитические;
2) графические;
3) численные;
4) экспериментальные (включающие и методы моделирования) [1].

Рассмотрим каждый метод подробнее.

Первый из перечисленных методов – *аналитический*. Данный метод дает возможность получить решение тепловой задачи в виде математического выражения для температуры как функции пространственных координат и времени. Решение должно удовлетворять определенному дифференциальному уравнению, из которого оно получено, и определенным начальным и граничным условиям, налагаемым самим конкретным процессом. Однако при этом почти во всех случаях приходится математически упрощать рассматриваемый процесс, для того чтобы этот метод мог дать желаемые результаты [1]. Поскольку процесс теплопередачи и теплообмена – типичный пример диффузионного процесса, то дифференциальное уравнение теплопроводности выводится на основе закона сохранения энергии и выглядит в виде уравнения (1):

$$dQ = \lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) dx dy dz d\tau, \qquad (1)$$

где dQ – общее количество теплоты в элементе объема $dx\ dy\ dz$ за время $d\tau$; λ – коэффициент теплопроводности [1].

Данное уравнение дает представление о формировании температурного поля в процессе теплообмена.

Второй из вышеперечисленных методов – *графический.* Для приближенной оценки расхода теплоты данный способ удобен, так как не рассматривается расчет температурного поля. В основу графического метода положена взаимная ортогональность изотерм и линий теплового потока [2].

Численный метод. Сложная форма тела, неоднородность его теплофизических характеристик, сложный характер граничных и временных условий часто не позволяют оценить температурные поля рассмотренными выше методами [3]. Для таких задач можно использовать численные методы расчета температурных полей, основанные на методике конечных разностей (или методе сеток). Дифференциальное уравнение теплопроводности при этом заменяется системой алгебраических уравнений, начальные и граничные условия также заменяются начальными и граничными условиями для сеточной функции. Дальнейшее решение задачи сводится к выполнению алгебраических действий [3].

Математическое моделирование температурных полей в изделиях играет важную роль в большинстве технологических процессов различных отраслей промышленности [4]. Моделирование температурных полей объектов включает в себя:

- создание тепловой модели объекта;
- составление математической модели процессов теплопереноса, протекающих в тепловой модели;
- решение уравнений математической модели;
- представление результатов в графическом и цифровом видах и их интерпретация.

Схемотехнический метод решения

Научно-технический прогресс предъявляет все более высокие требования к электротехническим устройствам, и их совершенствование должно предусматривать использование новых материалов, разработку новых принципов построения и создание оригинальных или обновленных методов проектирования. Одним из таких методов является метод, при котором проводится аналогия между процессом теплопроводности и электропроводности. Протекание тока в проводнике входит в группу физических процессов под общим названием – процессы энергомассопереноса. В эту группу входят также процессы теплопроводности, диффузии и др. Общим для них является то, что поток неко-

торой субстанции (ток, теплота) под действием разности значений некоторой величины (потенциала, температуры) распространяется через среду, оказывающую сопротивление этому потоку [2].

Уравнения теплопроводности и диффузии аналогичны уравнениям электропроводности (вместо закона Ома в их основе лежат аналогичные законы Фурье и Фика). При этом решение зависит не только от граничных условий, но также от начального состояния и времени [2].

Как изменяется физическая картина при переходе от задачи электропроводности к задаче теплопроводности? Предположим, что процесс теплопередачи происходит в полубесконечном стержне относительно температуры (контроль температуры осуществляется в начале стержня, а также в каждой другой его точке) [5]. Схемотехнически это можно представить в виде модели (рис. 1), построенной на RC-элементах.

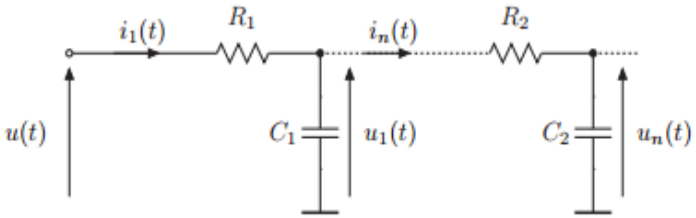


Рис. 1. Модель диффузионного процесса

Напряжение на каждом участке RC-линии представляет собой температуру в процессе теплопередачи, и аналогично ток представляет собой тепловой поток [5].

Из данной модели легко получается уравнение диффузии. Напряжение $u(x,t)$ между двумя каскадами представляет собой напряжение на резисторе R (3) и пропорционально току $i(x,t)$ в этом каскаде. Аналогично напряжение $u(x,t)$ конденсатора C в каждом каскаде может быть описано в виде уравнения (5):

$$u(x,t) - u(x+dx,t) = Ri(x,t), \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}u(x,t) = Ri(x,t), \tag{3}$$

$$i(x,t) - i(x+dx,t) = C\frac{\partial}{\partial t}u(x,t), \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = C \frac{\partial}{\partial t} u(x,t). \quad (5)$$

Данные выражения могут быть записаны в виде уравнения диффузии (6):

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x,t) = RC \frac{\partial}{\partial t} u(x,t). \quad (6)$$

Далее, введя начальные и граничные условия, решение задачи сводится к моделированию электрических процессов, не прибегая к решению задачи теории теплопроводности.

Результаты

Подводя итоги данной работы, стоит отметить, что каждый рассмотренный метод исследования температурного поля и процесса теплообмена описывает исследуемый объект достаточно точно. Однако существуют и различия между методами. Аналитический метод описания процесса теплообмена помогает сформировать физическое понятие процесса теплообмена и его зависимость от параметров. Аналитическое решение может описывать бесконечно длинные переходные диффузионные процессы в отличие от графического метода. Графический метод применим не для всех случаев и является менее точным. Решение задачи численными методами представляет собой трудоемкий процесс, а также предполагает глубокие знания тепловых процессов.

Выводы

Решение задачи предложенным схемотехническим методом демонстрирует результаты теплообмена с учетом тепловых потерь, что позволяет более грамотно смоделировать процесс теплопередачи.

Также стоит выделить высокую точность результатов моделирования процесса. Последний метод описывает как аналитически исследуемый процесс, так и прекрасно визуализирует полученные результаты.

Список литературы

1. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 38 с.

2. *Юдаев, Б. Н.* Теплопередача. – М. : Высш. школа, 1981. – 319 с.

3. *Жуков, Н. П.* Решение задач теплопроводности методом конечных элементов / Н. П. Жуков, Н. Ф. Майникова. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2014. – 5 с.

4. *Марголис, Б. И.* Программы моделирования температурных полей в изделиях плоской формы [Электронный ресурс] // swsys.ru Россия. – URL: http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=41 (дата обращения: 10.11.2017).

5. *Sierociuk, D.* Diffusion process modeling by using fractional-order models [Электронный ресурс] // URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300314015501 (дата обращения: 12.11.2017).

L. O. Dolgacheva, magister student
E-mail: Lidochka_LEDY@inbox.ru
N. D. Bazhenov, magister student
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Analysis of Research Methods of Temperature Field and Heat Exchange Process

The arcicle is devoted to analysis of main research methods of temperature field and heat exchange process. Four methods are considered: analytical, graphical, numerical and experimental. Also the arcicle describes alternative method of research of temperature field based on the analogy of thermal conductivity process and electrical conductivity process.

Keywords: temperature field, heat exchange process, research methods, RC-structure.

УДК 629.78+621.049.77

А. В. Иванов, аспирант
E-mail: kipres@ssau.ru
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Графический интерфейс программы расчета надежности паяных соединений

Рассмотрена программа расчета усталостной надежности паяных соединений электронных узлов. Для оценки надежности программы предложен удобный в эксплуатации графический интерфейс.

Ключевые слова: паяное соединение, электронный узел, надежность, программа расчета, графический интерфейс.

© Иванов А. В., 2018

Введение

В последние годы увеличилось число аварий из-за отказов бортовых радиотехнических и электронных устройств. Отказы изделий космической промышленности приводят к большим финансовым потерям ввиду невозможности или дороговизны выявления и ремонта отказа, произошедшего на объекте, находящемся в космосе, и даже к смертельным исходам [1]. Одной из причин этого является слабая изученность вопросов надежности импортной элементной базы, паяных соединений в условиях комбинированной и смешанной пайки, низкая информативность испытаний, отсутствие необходимого опыта проектирования и производства изделий с такими конструктивно-технологическими вариантами [2].

В современных конструкциях электронных узлов монтаж компонентов производится на многослойные печатные платы с высокой плотностью межсоединений. Технология межсоединений меняется быстрыми темпами. Используются компоненты с разным составом покрытий. Монтаж производится как свинецсодержащими, так и бессвинцовыми припоями [3, 4].

Структура паяного соединения включает следующие основные элементы: зону сплавления, диффузионные зоны, прикристаллизованные слои и основной металл [3].

В настоящее время надежность паяного соединения представляет особую актуальность. Установлено, что надежность паяных соединений поверхностного монтажа определяется областью отказов типа «износ» [1, 6–9].

Прочность паяного соединения зависит от дефектов в его структуре: «холодная пайка»; отсутствие смачивания; эрозия основного металла; газовые и усадочные поры; флюсовые, шлаковые и интерметаллические включения; кристаллизационные, релаксационные и термические трещины и др. [4–6].

В связи с этим возникает задача изучения усталостной прочности и оценки надежности паяных соединений на основе различных припоев.

Для оценки усталостной надежности паяных соединений целесообразно использовать модели Энгельмайера [10–15]. На основе этих моделей был разработан алгоритм расчета [16]. На его базе была разработана программа расчета.

Выбор языка программирования

В результате обзора языков программирования выбор пал на Java.

Одно из главных преимуществ языка Java – его независимость от платформы, на которой выполняются программы. Таким образом, один и тот же код можно запускать под управлением операционных систем Windows, Linux, FreeBSD, Solaris, Apple Mac и др. Это становится очень важным, когда программы загружаются посредством глобальной сети интернет и используются на различных платформах.

Другим не менее важным преимуществом Java является большая схожесть с языком программирования C++. Поэтому тем программистам, которые знакомы с синтаксисом C и C++, будет просто освоить Java.

Кроме того, Java – полностью объектно ориентированный язык, даже в большей степени, чем C++. Все сущности в языке Java являются объектами, за исключением немногих основных типов (primitive types), например чисел. В свое время объектно ориентированное программирование (ООП) заменило структурное программирование.

Важно и то, что разрабатывать на Java программы, которые не содержат ошибок, значительно легче, чем на C++.

Все дело в том, что разработчиками языка Java из компании Sun был проведен фундаментальный анализ программ на языке C++. Анализировались «узкие места» исходного кода, которые и приводят к появлению трудновыявимых ошибок. Поэтому было принято решение проектировать язык Java с учетом возможности создавать программы, в которых были бы скрыты наиболее распространенные ошибки.

Еще одно важное преимущество Java – это тесное взаимодействие с БД. С недавнего времени язык JAVA принадлежит корпорации Oracle, которая является ведущей в сфера разработки БД. Одним из векторов дальнейшего развития проектируемой программы является ее тесная интеграция с БД, что является немаловажным фактором в условиях современной разработки электронных изделий.

Проектирование классов Java

При разработке программы расчета усталостной надежности паяного соединения было выделено 9 классов:

1. Класс Solder предназначен для хранения параметров припоя.

2. Классы CLead, CLeadness и интерфейс Component. Классы CLead и CLeadness предназначены для хранения параметров выводных и безвыводных компонентов соответственно. Для повышения гибкости исходного кода было решено объединить эти классы интерфейсом Component.

3. Класс PCB предназначен для хранения параметров подложки (печатной платы).

4. Класс TParametr. Класс TParametr предназначен для хранения температурных параметров компонента и подложки при нагружении.

5. Класс NCycles предназначен для хранения параметров системы компонентов при нагружении.

6. Классы, реализующие интерфейс TableModel. Интерфейс TableModel поставляется в JDK и определяет методы класса JTable, который будет использован далее, для представления данных в виде таблиц. Интерфейс TableModel был реализован следующими классами: ComponentTableModel, NCyclesTableModel, PCBTableModel, SolderTableModel, TParametrTableModel.

7. Класс чтения, сохранения библиотек компонентов, припоев и подложек Libs. Для удобства пользования программой и возможной интеграции в будущем ее с БД было решено сделать возможным сохранение созданных объектов в библиотеки, а библиотеки хранить в памяти программы в виде структуры типа List. Для сохранения библиотек на жесткий диск в виде соответствующих XML-файлов был создан класс Libs.

8. Класс ElementOfSystem хранит группу компонентов одного типа, припой, при помощи которого они припаяны, параметр распределения отказов Вейбулла, а также температурные параметры нагружений компонентов данной группы.

9. Класс SystemSolder хранит все необходимые для расчета усталостной надежности параметры. Является наследником класса LinkedList<ElementOfSystem> (двусвязный циклический список). При помощи класса SystemSolder осуществляется расчет всех параметров надежности исследуемой системы.

Графический интерфейс программы

Был разработан графический интерфейс программы. Диаграмма классов графического интерфейса приведена на рис. 1.

На рис. 2 приведено главное окно графического интерфейса, а на рис. 3 – окно добавления компонента.

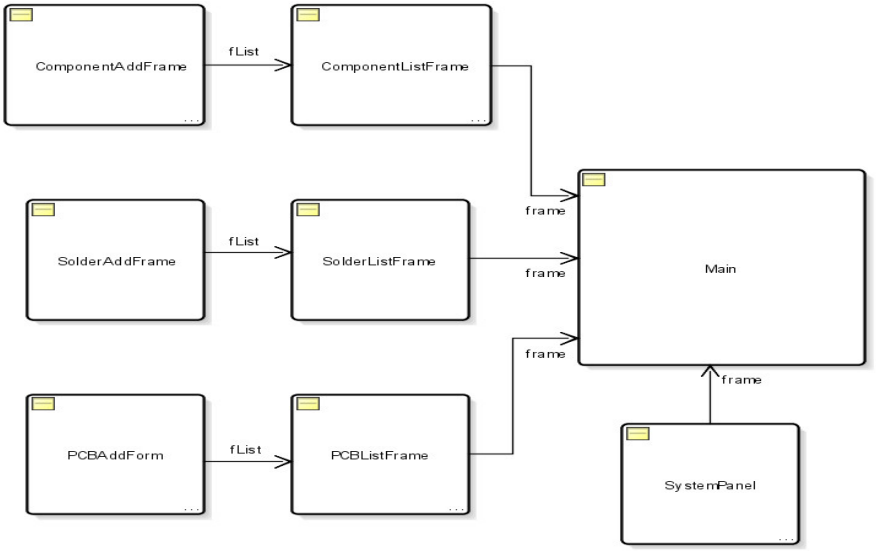


Рис. 1. Диаграмма классов графического интерфейса

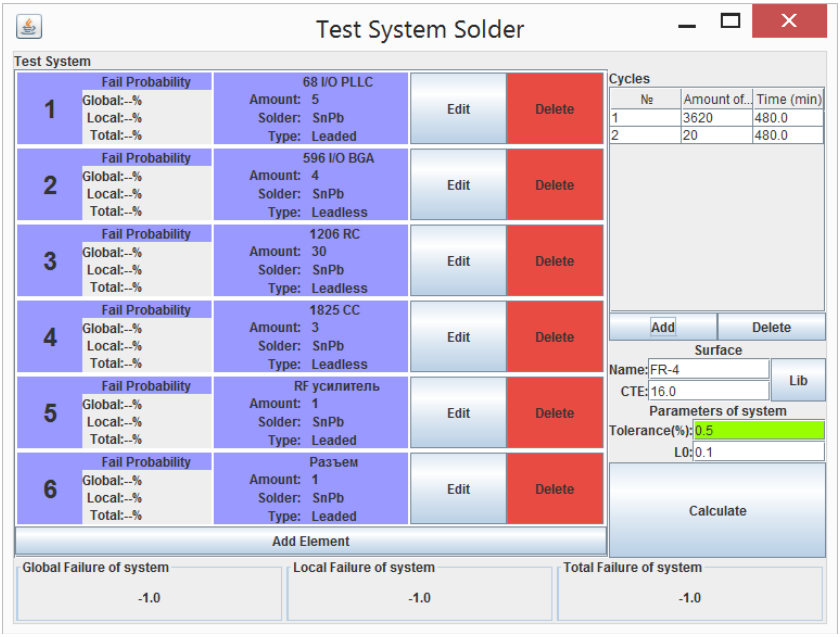


Рис. 2. Главное окно графического интерфейса

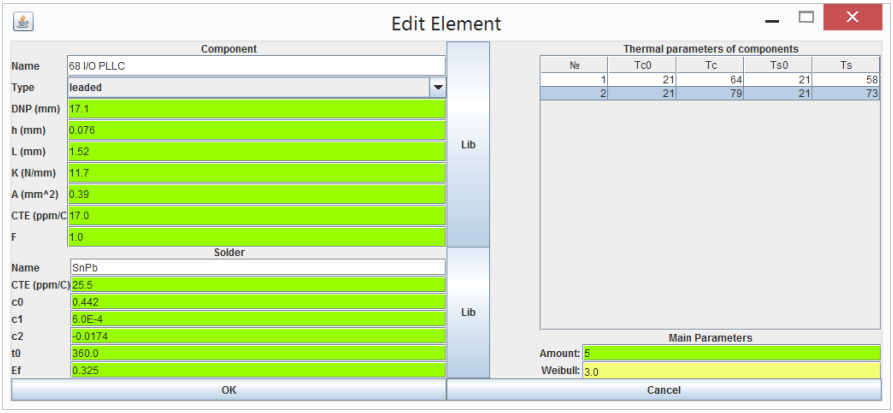


Рис. 3. Окно добавления компонента

На рис. 4 и 5 приведены окна добавления режимов работы и расчета параметров системы.

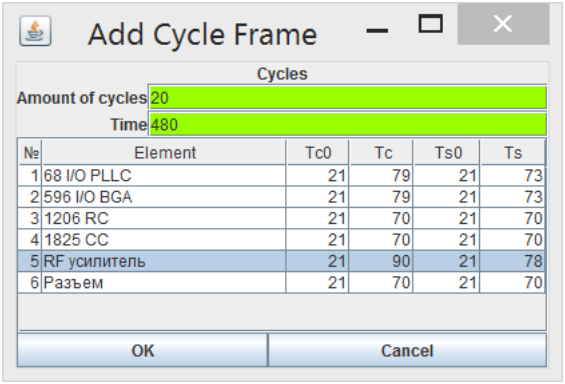
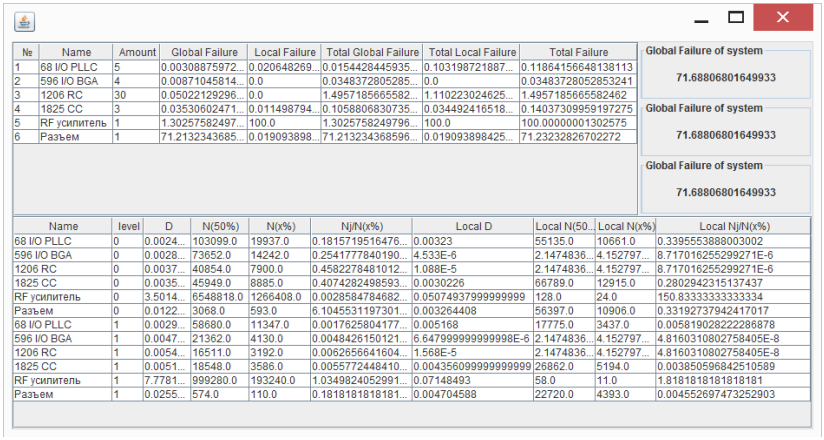


Рис. 4. Окно добавление режимов работы



№	Name	Amount	Global Failure	Local Failure	Total Global Failure	Total Local Failure	Total Failure
1	68 I/O PLLC	5	0.00308875972...	0.020648269...	0.0154428445935...	0.103198721887...	0.118641566481381 13
2	596 I/O BGA	4	0.00871045814...	0.0	0.0348372805285...	0.0	0.034837280528532 41
3	1206 RC	30	0.05022129296...	0.0	1.4957185665582...	1.110223024625...	1.4957185665582462
4	1825 CC	3	0.03530602471...	0.011498794...	0.1058806830735...	0.034492416518...	0.140373099591972 75
5	RF усилитель	1	1.30257582497...	100.0	1.3025758249796...	100.0	100.00000001302575
6	Разъем	1	71.2132343685...	0.019093898...	71.213234368596...	0.019093898425...	71.232328267022 72

Global Failure of system
71.68806801649933
Global Failure of system
71.68806801649933
Global Failure of system
71.68806801649933

Name	level	D	N(50%)	N(x%)	Nj/N(x%)	Local D	Local N(50...	Local N(x%)	Local Nj/N(x%)
68 I/O PLLC	0	0.0024...	103099.0	19937.0	0.1815719516476...	0.00323	55135.0	10661.0	0.3395553888003002
596 I/O BGA	0	0.0028...	73652.0	14242.0	0.2541777840190...	4.533E-6	2.1474836...	4.152797...	8.717016255299271E-6
1206 RC	0	0.0037...	40854.0	7900.0	0.4582278481012...	1.088E-5	2.1474836...	4.152797...	8.717016255299271E-6
1825 CC	0	0.0035...	45949.0	8885.0	0.4074282498593...	0.0030226	66789.0	12915.0	0.2802942315137437
RF усилитель	0	3.5014...	6548818.0	1266408.0	0.0028584784682...	0.05074937999999999	128.0	24.0	150.83333333333334
Разъем	0	0.0122...	3068.0	593.0	6.1045531197301...	0.003264408	56397.0	10906.0	0.33192737942417017
68 I/O PLLC	1	0.0029...	58680.0	11347.0	0.0017625804177...	0.005168	17775.0	3437.0	0.0058190282222286878
596 I/O BGA	1	0.0047...	21362.0	4130.0	0.0048426150121...	6.647999999999998E-6	2.1474836...	4.152797...	4.8160310802758405E-8
1206 RC	1	0.0054...	16511.0	3192.0	0.0062656641604...	1.568E-5	2.1474836...	4.152797...	4.8160310802758405E-8
1825 CC	1	0.0051...	18548.0	3586.0	0.0055772448410...	0.004356099999999999	26862.0	5194.0	0.003850596842510589
RF усилитель	1	7.7781...	999280.0	193240.0	1.0349824052991...	0.07148493	58.0	11.0	1.8181818181818181
Разъем	1	0.0255...	574.0	110.0	0.1818181818181...	0.004704588	22720.0	4393.0	0.004552697473252903

Рис. 5. Окно расчета параметров системы

Выводы

Проведенный анализ моделей качества и усталостной надежности паяных соединений показал целесообразность их использования для широкой номенклатуры припоев. Решение тестовой задачи подтвердило эффективность программы расчета показателей надежности системы компонент – припой – печатная плата. Разработан удобный в эксплуатации графический интерфейс программы.

Список литературы

1. *Наседкин, А. В.* Методика производственных испытаний электронных узлов / А. В. Наседкин, С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). – Самара, 2012. №7. – С. 76-84.

2. *Тюлевин, С. В.* Анализ качества паяных соединений чип-резисторов / С. В. Тюлевин, А. В. Наседкин, М. Н. Пиганов // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. НТК. – Самара : Изд-во СГАУ, 2011. – С. 214–221.

3. Исследование и анализ качества паяных соединений компонентов с торцевыми выводами / А. В. Наседкин, С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов, А. И. Архипов // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании : материалы междунар. науч.-практ. конф. (сб. науч. тр. SWorld). – Одесса : Черноморье, 2011. – Т. 9, вып. 4. – С. 50–54.

4. Новые паяльные пасты для поверхностного монтажа космической аппаратуры / С. В. Тюлевин, И. Ю. Шумских, А. В. Наседкин, М. Н. Пиганов //

Радиолокация и радиосвязь : материалы. V Всероссийской НТК. – М. : ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2011. – С. 129–131.

5. *Пиганов, М. Н.* Устройство пайки и лужения электронных средств / М. Н. Пиганов, А. В. Иванов // Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск : СФУ, 2017. – С. 582–585.

6. *Юрков, Н. К.* Технология радиоэлектронных средств : учебник. – Пенза : Изд-во ПГУ,. 2012. – 640 с.

7. Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа: IPC-SM-785. – Association Connecting Electronics Industries, 1992. – 44 с.

8. *Парфенов, А. Н.* Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности, 2008. – № 2. – С. 46–52.

9. *Кузнецов, О. А.* Прочность паяных соединений / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов. – М. : Машиностроение, 1987. – 112 с.

10. *Engelmaier, W.* How to estimate solder joint reliability, part 1 // Global SMT & Packaging, 2007. – Vol. 7. – No. 9. – Pp. 60–64.

11. *Wild, R. N.* Some fatigue properties of solders and solder joints // IBM Tech. Rep. 73Z000421. January 1973.

12. *Engelmaier, W.* How to estimate solder joint reliability, part 2 // Global SMT & Packaging, 2007. – Vol. 7. – No. 10. – Pp. 64–66.

13. *Engelmaier, W.* Creep-fatigue model for SAC 405/305 solder joint relibility estimation – a proposal // Global SMT & Packaging, 2008. – Vol. 8. – No. 12. – Pp. 46–48.

14. *Павлов, Н. И.* Исследование ресурса прочности паяных соединений электронных модулей, выполненных по совмещенной технологии (оловянно-свинцовой и бессвинцовой) : автореф. дис. … канд. техн. наук. – М. : МАИ, 2012. – 16 с.

15. *Иванов, А. В.* Оценка качества паяных соединений электронных узлов / А. В. Иванов, М. Н. Пиганов // Известия Самарского научного центра российской академии наук, 2016. – Т. 18, № 4 (7). – С. 1381–1386.

16. *Пиганов, М. Н.* Алгоритм и программа расчета усталостной надежности паяных соединений // М. Н. Пиганов, А. В. Иванов // Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск : СФУ, 2017. – С. 561–565.

A. V. Ivanov, postgraduate student
E-mail: kipres@ssau.ru
Samara National Research University, Russian Federation, Samara, Russia

Graphical Interface for Calculating the Reliability of Soldered Connections

Program for calculating the fatigue reliability of soldered connections of electronic components is considered. Engelmeyer models were used to assess the reliability. The main classes of this program are given. An easy-to-use graphical user interface is offered.

Keywords: soldered connection, electronic component, reliability, calculation program, graphical user interface.

УДК 004.942

И. В. Князев, А. А. Миронов, Н. А. Савченко, А. А. Митрошина, студенты
E-mail: knyazev.knizev@yandex.ru
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Сравнение возможностей анализа динамических характеристик линейных систем в программе Matlab и с помощью интернет-ресурса Wolfram Alpha

Статья посвящена сравнению двух программ – Matlab и интернет-ресурса Wolfram Alpha. Приводятся программные коды для проведения анализа передаточной функции, а именно построения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), фазо-частотной характеристики (ФЧХ), годографа.

Ключевые слова: Matlab, Wolfram Alpha, ЛАЧХ, ФЧХ, годограф, передаточная функция.

Введение

Задачи автоматизации математических расчетов в учебной, инженерной и научной практике решаются с помощью различного рода программных продуктов, которых в настоящее время существует большое количество. Большинство таких программ и программных пакетов являются проприетарными и платными. Наиболее известные представители этой группы: Matlab, MathCAD, Maple, SPSS, Statistica, AnyLogic, Wolfram Mathematica. Свободно распространяемые программные пакеты математического моделирования существуют в меньшем количестве и обладают меньшими возможностями по сравлению с платными аналогами. Сюда относятся такие продукты, как SciLab, GNU Octave, FreeMat, Maxima и Wolfram Alfa.

Сравним возможности и особенности проприетарного пакета Matlab и интернет-ресурса Wolfram Alpha в аспекте их применения для решения задач из таких областей, как теория цепей и теория линейных динамических систем и систем управления, а именно для анализа динамических частотных характеристик линейных систем, представленных в виде передаточных функций.

© Князев И. В., Миронов А. А., Савченко Н. А., Митрошина А. А., Глушков В. А., 2018

Краткая информация о Matlab и Wolfram Alpha

Matlab

Matlab (сокращение от англ. MatrixLaboratory) – это пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноименный язык програмирования, используемый в этом пакете. Он поддерживает математические вычисления, визуализацию научной графики и программирование с использованием легко осваиваемого операционного окружения (URL: https://matlab.ru/products/matlab). Наиболее известные области применения системы Matlab:

1) математика и вычисления;
2) разработка алгоритмов;
3) вычислительный эксперимент, имитационное моделирование;
4) анализ данных, исследование и визуализация результатов;
5) научная и инженерная графика;
6) разработка приложений, включая графический интерфейс пользователя;
7) автоматизация измерений и управление оборудованием.

Существуют версии Matlab для операционных систем Windows, MacOS, Linux.

Цены на лицензии Matlab (URL: https://www.mathworks.com/pricing-licensing.html):

1) академическая лицензия на 1 ПК – $550;
2) ежегодное обновление для академической лицензии на 1 ПК – $275;
3) студенческая лицензия на 1 ПК – $99.

Wolfram Alpha

Вычислительное ядро Wolfram Alpha работает онлайн, все базы данных находятся в сети и не нуждаются в скачивании, что значительно упрощает работу с системой. Для доступа к Wolfram Alpha пользователю требуется настольный или переносной ПК, планшет или смартфон с доступом в интернет (URL: http://www.wolframalpha.com/about.html).

Язык Wolfram Alpha семантически ближе к письменной человеческой речи, что облегчает работу пользователя с этой системой: благодаря использованию интуитивных названий функций, состоящих из английских слов, данный язык исключительно просто читать, использовать и изучать (URL: https://www.wolfram.com/language/).

Цены на лицензии WolframAlpha (URL: http://www.wolframalpha.com/pro/pricing):

1) без регистрации и лицензии, но с ограничениями – бесплатно;
2) студенческая профессиональная – $4,75 в месяц;
3) студенческая премиум – $7,99$ в месяц;
4) академическая профессиональная – $4,75 в месяц;
5) академическая премиум – $7,99 в месяц.

Постановка задачи анализа

Для сравнения работы в данных системах решим задачу построения частотных характеристик следующей передаточной функции линейной стационарной системы, представленной в дробно-рациональном виде [1]:

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + ... + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + ... + a_1 p + a_0},$$

где m – порядок полинома числителя, n – порядок полинома знаменателя, p – комплексная частота, b_i и a_i – коэффициенты.

В качестве примера используем передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{0,09p + 0,9}{0,00729p^2 + 0,828p + 1,8}.$$

Для данной передаточной функции построим:

1) АЧХ;
2) ФЧХ;
3) годограф.

В каждой из систем рассмотрим следующие действия:

1) задание передаточной функции в виде объекта для анализа;
2) представление передаточной функции с выделенными нулями, полюсами и обобщенным коэффициентом передачи;
3) команда для построения АЧХ;
4) команда для построения ФЧХ;
5) команда для построения годографа.

Анализ в пакете математического моделирования Matlab

1. Задание передаточной функции [2].

В командной строке вводим следующее:

```
W = tf ([0.09 0.9],[0.00729 0.828 1.8])
```

Результатом является создание в рабочем пространстве LTI-объекта с именем W:

```
W =
          0.09 s + 0.9
  --------------------------
  0.00729 s^2 + 0.828 s + 1.8

Continuous-time transfer function.
```

2. Для представления передаточной функции с выделенными нулями, полюсами и обобщенным коэффициентом передачи используется команда zpk(W).

Результатом является создание в рабочем пространстве LTI-объекта:

```
ans =

     12.346 (s+10)
  -------------------
  (s+111.4) (s+2.217)

Continuous-time zero/pole/gain model.
```

3. Для построения АЧХ и ФЧХ используется команда bode(W).

В результате программа выводит следующий график, представленный на рис. 1.

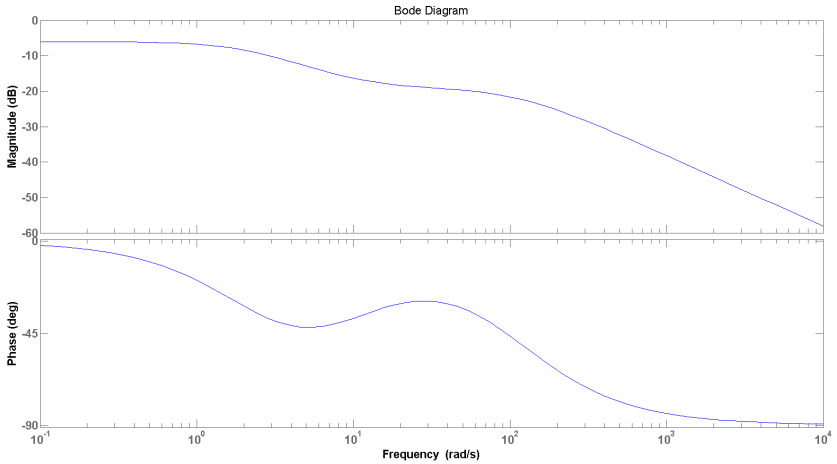


Рис. 1. АЧХ и ФЧХ, полученные в Matlab

4. Для построения годографа используется команда nyquist(W).

В результате программа выводит следующий график, представленный на рис. 2.

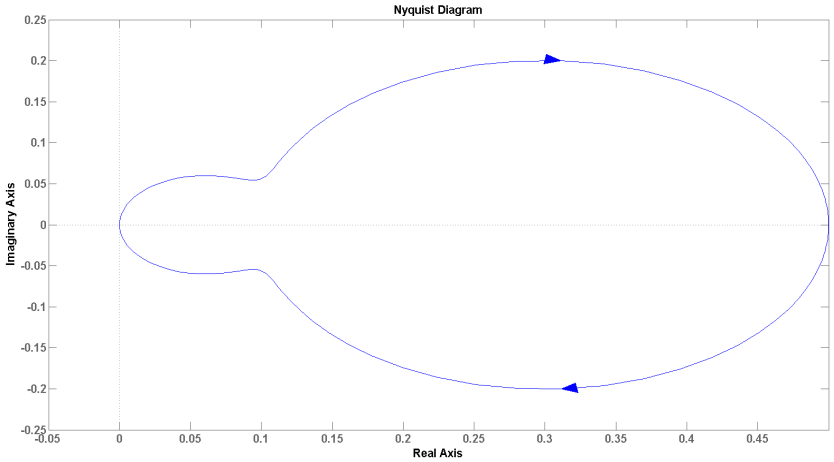


Рис. 2. Годограф, полученный в Matlab

Годограф построен для отрицательных и положительных частот.

Анализ в системе Wolfram Alpha

1. Задание передаточной функции [3].

В командной строке вводим следующее:

transfer function (0.09s+0.9)/(0.00729s^2+0.828s+1.8)

Результатом является создание в рабочем пространстве LTI-объекта с именем systems model | transfer function:

```
systems model | transfer function (0.9 + 0.09 s)/(1.8 + 0.828 s + 0.00729 s^2)
```

2. Для представления передаточной функции с выделенными нулями, полюсами и обобщенным коэффициентом передачи используется команда *simplify (0.09s+0.9)/(0.00729s^2+0.828s+1.8)*.

Результатом является создание в рабочем пространстве объекта:

```
(12.3457 (s + 10.))/((s + 2.21719) (s + 111.363))
```

3. Для построения АЧХ и ФЧХ используется команда *bode (0.09s+0.9)/(0.00729s^2+0.828s+1.8)*.

В результате программа выводит следующий график, представленный на рис. 3.

При этом по умолчанию графики АЧХ и ФЧХ представлены в логарифмическом масштабе. Если работать в системе без регистрации, то изменить масштаб графиков, их диапазоны и оформление будет нельзя.

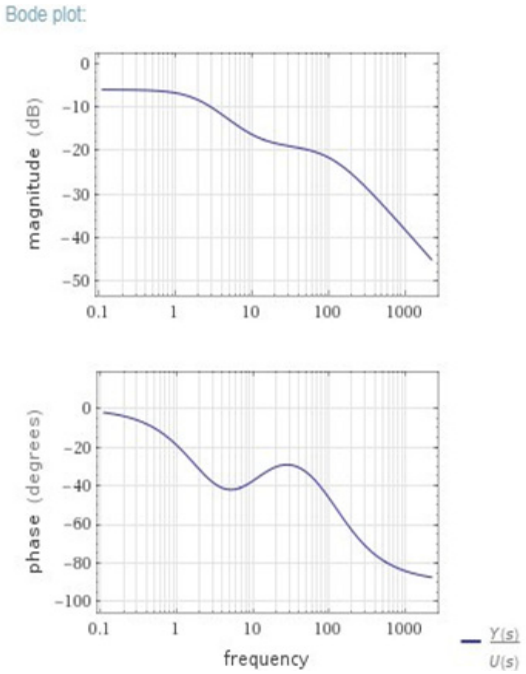


Рис.3. АЧХ и ФЧХ, построенные в Wolfram Alpha

4. Для построения годографа используется команда *nyquist (0.09s+0.9)/(0.00729s^2+0.828s+1.8)*.

В результате программа выводит следующий график, представленный на рис. 4.

И в системе Matlab, и в системе Wolfram Alpha оказалось возможным решить поставленную задачу анализа частотных характеристик линейной динамической системы, заданной в виде передаточной функции, причем уровень сложности работы с системами оказался одинаковый. В рамках поставленной задачи результат, полученный с помощью рассмотренных систем моделирования (представление передаточной функции и графики АЧХ, ФЧХ, АФЧХ), достигнут с одинаковой точностью.

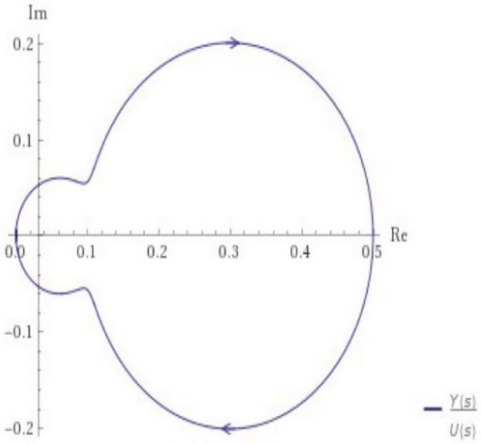


Рис. 4. Годограф, построенный в Wolfram Alpha

Выводы

Обе системы моделирования одинаково удобны и одинаково хорошо подходят для анализа характеристик линейных систем, заданных с помощью математических законов и преобразований. При этом очевидные достоинства Wolfram Alpha по сравнению с Matlab – это дешевизна и отсутствие привязанности к конкретным аппаратным и программным платформам.

Однако если возникнет задача структурного моделирования систем и их имитационного моделирования, то функциональное преимущество и удобство будет на стороне системы Matlab.

Список литературы

1. *Бесекерский, В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2007. – 752 с.

2. *Дьяконов, В. П.* MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с. – (Библиотека профессионала).

3. *Дьяконов, В. П.* Mathematica 5.1/5.2/6 в математических и научно-технических расчетах. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 744 с.

I. V. Knyazev, A. A. Mironov, N. A. Savchenko, A. A. Mitroshina, students
E-mail: knyazev.knizev@yandex.ru
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Comparing the Capabilities of Matlab Software and Wolfram Alpha Web-Service to Analyze the Linear System Dynamic Characteristics

The paper considers comparative analysis of two mathematical modeling systems – Matlab software and Wolfram Alpha web-service. It comprises code listings to create the specified transfer function of a linear system, to process it and to analyze its frequency response function (magnitude, phase and locus).

Keywords: Matlab, Wolfram Alpha, amplitude frequency response, phase frequency response, bode diagram, locus, transfer function.

УДК 629.78+621.049.77

В. А. Маклашов, начальник отделения
АО «Научно-исследовательский институт «Экран»
М. Н. Пиганов, д-р техн. наук, проф.
E-mail: kipres@ssau.ru
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королёва

Блок контроля и управления лазерной системой

Разработана структурная схема блока контроля и управления лазерной системой. Блок состоит из модулей преобразователя и питания. Приведены основные функции этих модулей. Рассмотрен принцип действия блока контроля и управления.

Ключевые слова: блок контроля и управления, модуль преобразователя, модуль питания, лазерная система, принцип действия.

Введение

В настоящее время весьма востребованы малогабаритные комплексы нового поколения для защиты летательных аппаратов различного назначения с функциями радиотехнической разведки и радиоэлектронного подавления [1–6], выполненные по модульной технологии

© Маклашов В. А., Пиганов М. Н., 2018

VPX [7]. Частным случаем таких комплексов являются станции оптико-электронного подавления. В таких системах источником инфракрасного излучения являются инфракрасные лампы. Минусом таких систем является то, что вспышка от инфракрасной лампы лишь на время сбивает с курса головку самонаведения (ГСН). Однако остается большая вероятность того, что ракета вернется на прежний курс и поразит потенциальную цель. Использование лазерного излучателя для срыва атакующей ракеты вместо инфракрасной лампы обеспечивает надежную защиту при взлете, в полете на высотах до трех километров и при посадке. Суть действия станции помех заключается в следующем. При облучении ГСН ракеты лазерным излучением в ее систему управления вносится ошибка. В результате нарушается нормальный режим работы, и ГСН ракеты теряет сопровождаемую цель. Такие станции обеспечивают обнаружение и сопровождение ракет, а также последующее подавление их ГСН лазерным излучением с вероятностью более 90 %. Использование систем такого рода позволяет обеспечивать сопровождение двух и более ракет.

Система на основе лазера автоматизирована и работает без вмешательства оператора. Для такой системы необходим блок контроля и управления, который обеспечивает работоспособность системы в целом и поддерживает необходимые характеристики. Каждую систему оптико-электронной установки на летательный аппарат необходимо протестировать на работоспособность. Для этого создан лабораторный стенд системы управления лазерной установкой, который будет имитировать работу бортового блока системы контроля и управления станцией оптико-электронного подавления.

Объектом исследования является лабораторный стенд для испытания системы контроля и управления лазерной установкой, входящей в станцию оптико-электронного подавления.

Цель работы – разработать устройство формирования напряжений питания и сигналов управления, входящего в лабораторный стенд.

Краткое описание лабораторного стенда

Лазерная установка – сложное оптико-электронное устройство, предназначенное для выполнения тактических операций. Во время выполнения операций требуется переключение лазера в различные режимы работы, контроль состояния системы, проверка работоспособности лазера, а также сохранение некоторых текущих характеристик лазера. Переключение режимов работы осуществляется как в автоматическом режиме, на основании решения бортового компьютера,

так и в ручном режиме оператором. Блок контроля и управления лазерной установки выполняет необходимые функции.

Принцип работы БКУ

Структурная схема БКУ приведена на рисунке.

БКУ предназначен для выполнения следующих функций:

– опроса датчиков температуры и давления и контроля стыковки разъемов;

– задания режимов работы лазера;

– осуществления обмена данными с бортовым компьютером;

–формирования необходимых управляющих сигналов для управления бортовой лазерной установкой (БЛУ).

БКУ состоит из двух электронных модулей:

– модуля преобразователя;

– модуля питания.

Модуль преобразователя в процессе работы БКУ постоянно циклически считывает с датчиков, входящих в состав БЛУ, следующие параметры:

– температуру в приборном отсеке (температуру в баллоне системы обеспечения газом) по датчику резистивного типа ТСМ-1388;

– температуру в лазерном отсеке по датчику резистивного типа ТСП-1287;

– давление в баллоне системы обеспечения газом по датчику типа ДМП-15А;

– давление в приборном отсеке по датчику типа МИДА-ПА-51;

– давление в лазерном отсеке по датчику типа МИДА-ПА-51;

– энергию лазерного излучения по датчику типа АГС2004.00.040.

В целях контроля работоспособности всей системы в целом модуль преобразователя контролирует наличие питающих напряжений, подаваемых на БКУ и формируемых внутри модуля питания.

Для контроля факта стыковки соединителей через каждый из них пропущена контрольная цепь, по которой в случае соединения протекает ток от БКУ. Блок контролирует наличие тока и определяет факт стыковки соединителей (сигналы «Контроль 1», «Контроль 2» и «Контроль 3»).

БКУ поддерживает тепловой режим составных частей БЛУ в допустимом диапазоне температур от 0 до плюс 40 °С.

Нагрев осуществляется за счет встроенных нагревателей, для чего по цепям «Питание ОЛ» и «Обогрев» подается напряжение 115 В, 400 Гц через силовые реле управляемые командами формируемыми

БКУ по информации получаемой от датчиков температуры. Охлаждение осуществляется при помощи системы кондиционирования.

Система готова к работе после установления температуры и давления в заданных пределах при наличии всех контролируемых напряжений и стыковки разъемов, при этом в БКУ формируется признак «БЛУ в норме», который считывается из него бортовым компьютером по каналу обмена данными. Данный режим работы называется «Дежурный режим».

Приняв эту информацию, бортовой компьютер может своими командами перевести систему либо в режим «Рабочий», либо в режим «Контрольный». Оба эти режима связаны с процессом генерации лазерного излучения БЛУ. Отличие заключается лишь во временных характеристиках формируемых импульсных последовательностях лазерного излучения.

БЛУ формирует импульс лазерного излучения после прихода сигнала «ПУСК» от БКУ в виде электрического импульса. Количество и периоды выдачи этого сигнала хранятся в памяти БКУ под номерами, называемыми «номера режимов подавления». Когда бортовой компьютер выдает команду на генерацию излучения, он сопровождает ее соответствующим номером режима подавления.

Во время отработки режимов «Рабочий» или «Контроль» БКУ считывает от датчика энергии излучения величину энергии лазерного импульса, подсчитывает число импульсов с энергией больше установленного порогового значения и вычисляет среднее ее значение за время длительности режима.

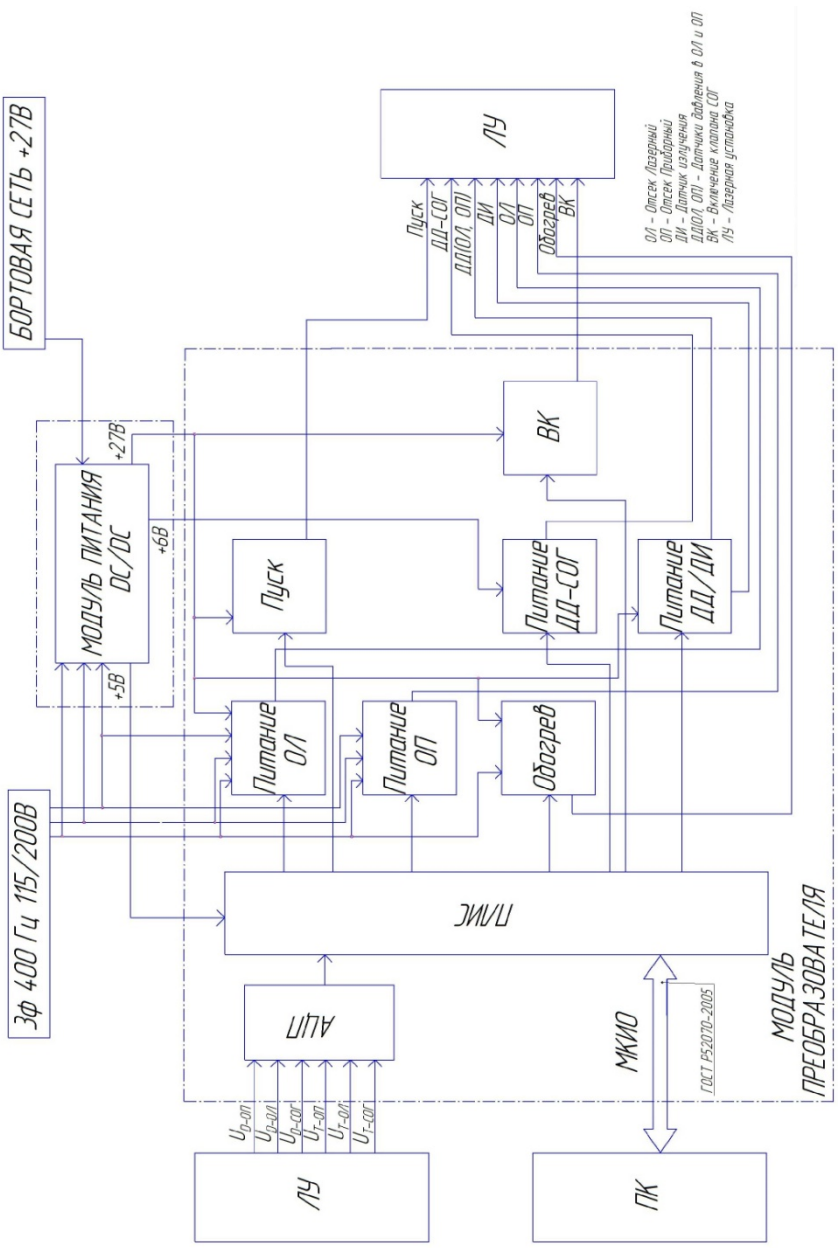
БКУ сохраняет в своей памяти следующую информацию:

– об общем, с начала эксплуатации, количестве импульсов, сгенерированных БЛУ;

– о количестве импульсов после предыдущей замены фильтра в газовой сети БЛУ;

– о количестве импульсов после последней заправки лазерного отсека;

– о количестве импульсов после последнего процесса обновления газа, осуществляемого подачей импульса определенной длительности и формы на впускной клапан подачи газа, находящегося внутри БЛУ.



Структурная схема БКУ

Выводы

Предложен новый вариант блока контроля и управления лазерной установкой, входящей в состав станции оптико-электронного подавления. Блок обладает большой гибкостью, высокой надежностью и технологичностью. Данное изделие рекомендовано для промышленного производства.

Список литературы

1. Малогабаритный модульный комплекс РТР и РЭП индивидуальной защиты летательных аппаратов / Д. В. Шерстнёв, В. А. Маклашов, Ю. В. Мазуров, В. К. Тезейкин // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных силах Российской Федерации. – 2017. – № 1. – С. 172–173.

2. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.

3. *Цветнов, В. В.* Радиоэлектронная борьба. Радиоразведка и радиопротиводействие. Т. 2 / В. В. Цветнов, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М. : МАИ, 1998. – 248 с.

4. *Куприянов, А. И.* Теоретические основы радиоэлектронной борьбы / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М. : Вузовская книга, 2007. – С. 59–64.

5. *Гуткин, Л. С.* Проектирование радиосистем и радиоустройств : учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 36–37.

6. *Денисов, В. П.* Фазовые радиопеленгаторы / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин. – Томск : Изд-во ТУСУР, 2002. – 251 с.

7. *Маклашов, В. А.* Модульная технология VPX в технике РЭБ // Радиотехника. – 2016. – № 1. – С. 28–31.

V. A. Maklashov, head of department
Joint-Stock Company “Scientific-Research Institute “Ekran”
M. N. Piganov, DSc in engineering, professor
E-mail: kipres@ssau.ru
Samara National Research University named after acad. Korolyov S.P.

Control and Operation Unit of Laser System

A structural scheme of the control and operation unit of laser system has been developed. The unit consists of converter and power modules. The main functions of these modules are given. The operating principle of the control and operation unit is considered.

Keywords: control and operation unit, converter module, power module, laser system, operating principle.

УДК 621.3.011

К. О. Максимов, канд. техн. наук, доцент
Ю. А. Первякова, Э. В. Порошин, Е. В. Симкина, студенты
E-mail: pervyakovay@mail.ru
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, профессор
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ параметров толстопленочных элементов с фрактальным импедансом со структурой слоев R-C-NR

В работе проведен анализ образцов элементов с фрактальным импедансом (ЭФИ), изготовленных по толстопленочной технологии. Показано, что ФЧХ образцов ЭФИ соответствуют ФЧХ синтезированных моделей. Произведена оценка разброса удельных параметров резистивных слоев образцов ЭФИ.

Ключевые слова: элементы с фрактальным импедансом, структура R-C-NR, толстопленочная технология, фазочастотная характеристика.

Введение

Элементы с фрактальным импедансом (ЭФИ) – это пассивные электронные компоненты, имеющие дробно-степенную зависимость входного импеданса от частоты вида:

$$\frac{U(p)}{I(p)} = Z(p) = A_\alpha (p)^{-\alpha}, \qquad (1)$$

где $U(p)$ – напряжение; $I(p)$ – сила тока; $Z(p)$ – входной импеданс; p – комплексная частота; α – дробный порядок; $A_\alpha = \text{const}$, $0 < |\alpha| < 1$.

Особенностью ЭФИ являются частотные характеристики его входного импеданса. Для идеального ЭФИ логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) имеет вид наклонной линии со скоростью спада (нарастания) 20α дБ/дек (децибел на декаду). Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – прямая линия с постоянной фазой, равной $(90\alpha)°$. Однако реальные образцы ЭФИ имеют ограниченный

© Максимов К. О., Первякова Ю. А., Порошин Э. В., Симкина Е. В., Ушаков П. А., 2018

диапазон частот, в котором эти особенности проявляются с определенной точностью.

На сегодняшний день применяются два подхода к реализации ЭФИ:

1. В виде электрических цепей, состоящих из R- и C-элементов с сосредоточенными параметрами, входной импеданс которых в ограниченном диапазоне частот соответствует (1). Такой вид ЭФИ может быть изготовлен только в виде сборочной единицы с присущими этому виду конструкции недостатками.

2. В виде отдельного двухполюсного компонента, связь между током и напряжением на входе которого соответствует (1). Такой путь является более предпочтительным, так как основан на свойствах среды распространения электрического сигнала и не требует сборочных операций.

Попытки прямой реализации и моделирования ЭФИ как дискретных элементов можно найти в литературе, где такие элементы основаны на полиметил-метакрилате [1], ионных полимерных металлических композитах [2] или на полимер-углеродных нанотрубках [3]. Однако эти элементы находятся еще из стадии экспериментального исследования.

Более успешная реализация этого подхода заключается в использовании для создания ЭФИ резистивно-емкостной среды в виде многослойной конструкции со структурой слоев «резистор 1-диэлектрик-резистор 2» (в дальнейшем R-C-NR-ЭРП – элемент с распределенными параметрами).

Первые экспериментальные образцы ЭФИ, созданные на основе R-C-NR-ЭРП, были описаны в работе [4]. Однако для подтверждения повторяемости полученных результатов, хорошей воспроизводимости результатов синтеза модели ЭФИ в изготовленных по этим результатам образцах ЭФИ требовалось, по крайней мере, изготовления еще одной партии ЭФИ с другим набором параметров. Такая партия ЭФИ была спроектирована и изготовлена по толстопленочной технологии.

Целью данной статьи является проверка воспроизводимости результатов синтеза на изготовленных образцах.

Описание эксперимента

Для проведения измерений было изготовлено 10 подложек, на каждой из которых располагались кроме ЭФИ с различными параметрами контрольные резисторы, контрольные конденсаторы и контрольные однородные R-C-NR-ЭРП. Фотография тестовой подложки изображе-

на на рис. 1. Здесь элементы, обозначенные ЭФИ, – это двухполюсные элементы с фрактальным импедансом на основе нескольких однородных R-C-NR-ЭРП, образующих интегральную конструкцию. Обозначение $C_к$, $R_к$ имеют контрольные конденсаторы и контрольные резисторы. R – контрольные однородные R-C-NR-ЭРП.

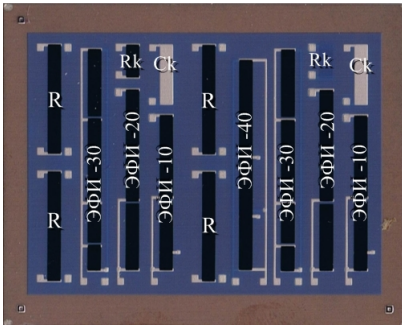


Рис. 1. Опытный образец подложки с ЭФИ

На рис. 2–5 изображены графики измеренных ФЧХ импеданса образцов ЭФИ для одной из подложек (помеченных как 2) в сравнении с ФЧХ, полученных в программе синтеза модели ЭФИ (помеченных как 1).

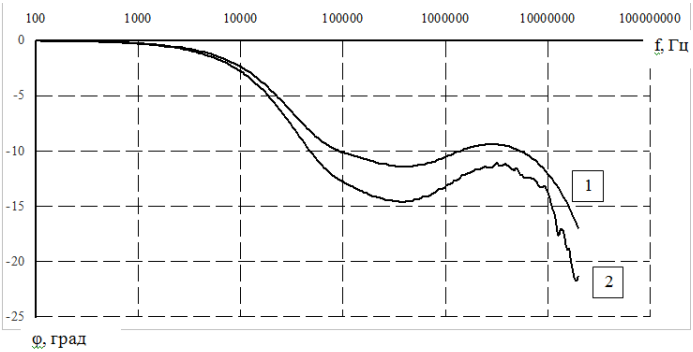


Рис. 2. Графики ФЧХ входного импеданса ЭФИ с постоянством фазы –10º:
1 – теоретическая ФЧХ, *2* – измеренная ФЧХ

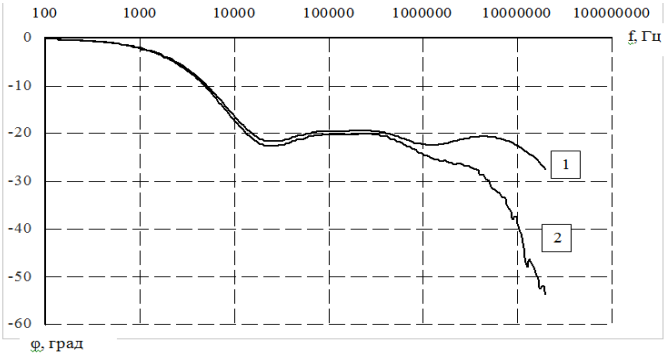


Рис. 3. Графики ФЧХ входного импеданса ЭФИ с постоянством фазы –20º:
1 – теоретическая ФЧХ, *2* – измеренная ФЧХ

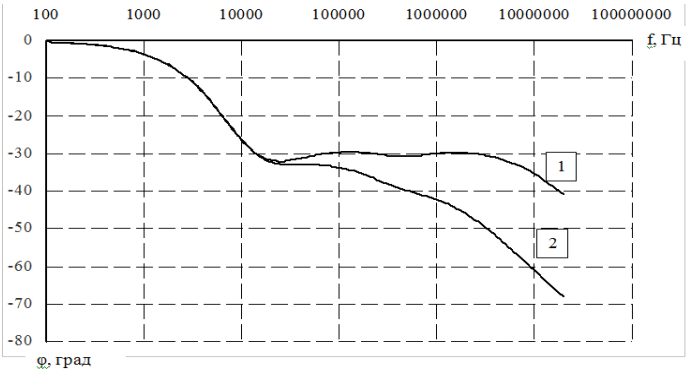


Рис. 4. Графики ФЧХ входного импеданса ЭФИ с постоянством фазы –30º:
1 – теоретическая ФЧХ, *2* – измеренная ФЧХ

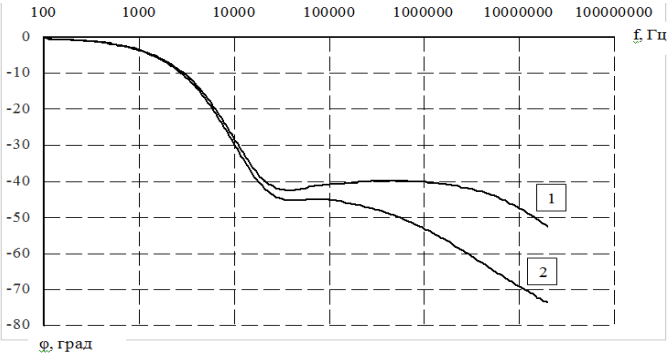


Рис. 5. Графики ФЧХ входного импеданса ЭФИ с постоянством фазы –40º:
1 – теоретическая ФЧХ, *2* – измеренная ФЧХ

Видим, что образцы ЭФИ с постоянством фазы –10° (рис. 2) и –20° (рис. 3) по своим частотным характеристикам вполне удовлетворительно соответствуют характеристикам синтезированных моделей. Гораздо меньшая степень соответствия наблюдается для образцов, изготовленных для реализации постоянства фазы –30° (рис. 4) и –40° на частотах более 50 кГц (рис. 4, 5). На первый взгляд это различие может быть связано с тем, что данные образцы имеют более сложную топологию, больше по размерам, имеют длинные проводящие коммутирующие дорожки. Все это может вносить дополнительные паразитные емкости и индуктивности, влияние которых будет заметно именно на высоких частотах.

Также для оценки изготовленных подложек были проведены измерения значений сопротивлений контрольных однородных R-C-NR ЭФИ. Результаты измерений для подложки № 2 приведены в таблице. Следует отметить, что полученные значения сопротивлений отличаются от значений, заложенных в конструкторской документации.

Значения сопротивлений контрольных однородных R–C-NR ЭФИ подложки № 2

№ структуры	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
Значение по КД, кОм	8±20%	8±20%	8±20%	8±20%	48±20%	48±20%	48±20%	48±20%
Полученное значение, кОм	58,8	56,6	54,5	52,3	308,3	328,8	317,5	330,1

Произведен расчет дисперсии, математического ожидания, среднеквадратичного отклонения. По полученным результатам построены графики распределения значений удельного сопротивления контрольных однородных R-C-NR ЭФИ и двухполюсных элементов с фрактальным импедансом, находящихся на разных слоях, где $f(x)$ – плотность распределения, x – случайная величина (рис. 6–9).

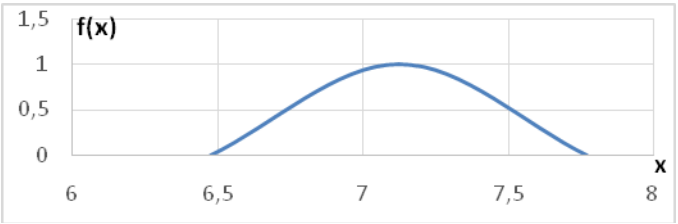


Рис. 6. График распределения значений удельного сопротивления R-C-NR ЭФИ. Нижний слой

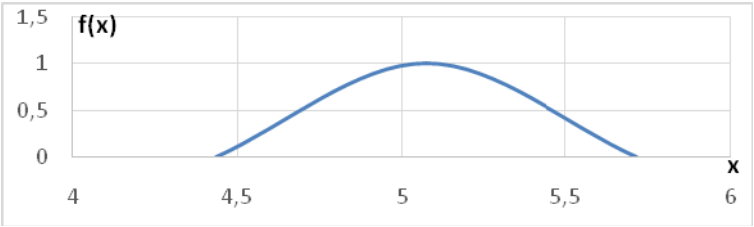


Рис. 7. График распределения значений удельного сопротивления ЭФИ. Нижний слой

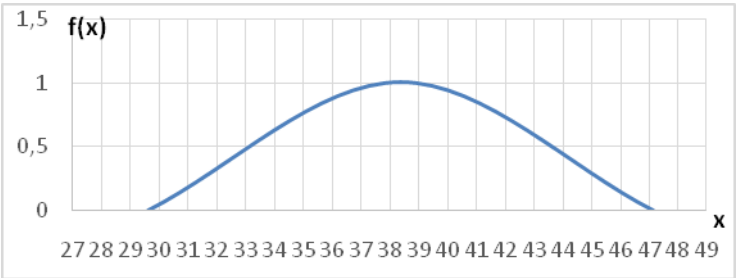


Рис. 8. График распределения значений удельного сопротивления R-C-NR ЭФИ. Верхний слой

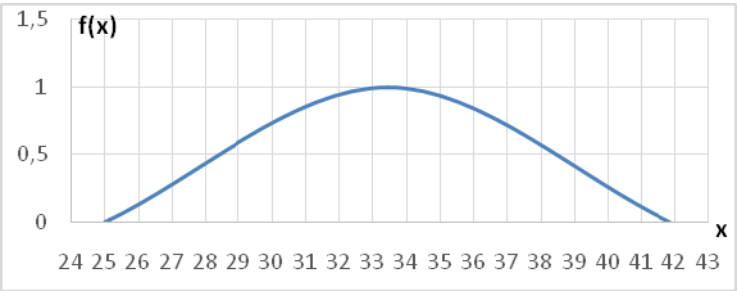


Рис. 9. График распределения значений удельного сопротивления ЭФИ. Верхний слой

Проведя анализ данных, можно увидеть большой разброс значений удельного сопротивления и номинальных значений контрольных R-C-NR ЭФИ. Причинами данного разброса могут служить: погрешности, возникающие в процессе изготовления многослойных резистивно-емкостных сред, а также неотработанный технологический процесс.

Выводы

Предварительный анализ параметров и характеристик образцов толстопленочных ЭФИ показал, что для повышения воспроизводимости результатов синтеза моделей ЭФИ при их изготовлении в виде физических образцов необходимо:

1. Проектировать конструкции ЭФИ с топологией, исключающей длинные коммутирующие перемычки.

2. Отдавать предпочтение при выборе варианта конструкции ЭФИ тем, которые имеют меньшее число R-C-NR-ЭРП.

3. Предусмотреть в программе синтеза учет влияния паразитных емкостных и индуктивных элементов, если они не могут быть исключены по конструктивно-технологическим ограничениям.

4. Отработать технологию изготовления многослойных толстопленочных ЭФИ.

Список литературы

1. *Mondal, D*. Performance study of fractional order integrator using single-component fractional order element / D. Mondal, K. Biswas // IEET Circuits, Devices and Systems. – 2011. – Vol. 5. – Pp. 334–342.

2. An enhanced fractional order model of ionic polymer-metal composites actuator / R. Caponetto, S. Graziani, F. Sapuppo, V. Tomasello // Advances in Mathematical Physics. – 2013. – Article ID 717659. – Pp. 6–11.

3. *John, D.* Electrical equivalent circuit modelling of solid state fractional capacitor / D. John, K. Biswas // AEU – Int. J. Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 78. – Pp. 258–264.

4. *Maksimov, K. O*. Research of fractal thick-film elements frequency responses. // 11-th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices proceedings. – Novosibirsk : NSTU, 2010. – Pp. 165–167.

5. *Максимов, К. О.* Разработка и обоснование структурной модели толстопленочных R-C-NR-элементов с распределенными параметрами / К. О. Максимов, П. А. Ушаков // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 2. – С. 145–148.

K. O. Maksimov, CSc in engineering, associate professor
Y. A. Pervyakova, E. V. Poroshin, E. V. Simkina, students
E-mail: pervyakovay@mail.ru
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Analysis of the Parameters of Thick-Film Elements with Fractal Impedance with Structure of R-C-NR Layers

In this paper, an analysis is made of samples of elements with fractal impedance (EFI), manufactured using thick-film technology. It is shown that the PFC of EFI samples correspond to the PFC of synthesized models. The variation in the specific parameters of the resistive layers of the EFI samples is estimated.

Keywords: elements with fractal impedance, structure of R-C-NR, thick-film technology, phase-frequency characteristic.

УДК 621.318.132

И. В. Манченко, студент
E-mail: manchenko_ilya@mail.ru
И. С. Марченко, студент
E-mail: IlyaZiU682@yandex.ru
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
E-mail: GL@idz.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Сравнение магнитопроводов, применяемых в трансформаторах блоков питания космической техники

Статья содержит сравнительный анализ сердечников из феррита и магнитодиэлектриков, применяющихся в импульсных источниках питания, применительно к космической технике. В ходе расчетов получена сравнительная оценка массогабаритных параметров.

Ключевые слова: феррит, Mo-пермаллой, DC-DC-преобразователь, источник питания, flyback, трансформатор.

Введение

В настоящее время имеется тенденция в сторону уменьшения размеров и массы устройств космической техники. При этом повышается экономическая эффективность полетов в космос, становится возможным выведение на орбиту большего числа аппаратов.

Источники питания являются неотъемлемой частью любого устройства, но в то же время и самыми проблемными с точки зрения оп-

© Манченко И. В., Марченко И. С., Глушков В. А., 2018

тимизации их размеров и массы. В составе источников питания одним из массивных и тяжелых элементов является трансформатор.

О том, каким образом можно оптимизировать его массу и размер, и пойдет речь в данной статье.

Сведения из теории

Пермаллой – магнитомягкий сплав никеля с железом с высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой Нс и малыми потерями на гистерезис.

Магнитные свойства пермаллоев очень чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава, наличия примесей в сплаве, от режимов термической обработки материала, которую проводят в вакууме либо в среде водорода иногда при наложении магнитного поля.

Магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты, причем тем резче, чем больше ее первоначальное значение. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления.

Для придания сплавам необходимых свойств в состав пермаллоев вводят ряд добавок. Молибден и хром повышают удельное сопротивление и начальную магнитную проницаемость пермаллоев и уменьшают чувствительность к механическим деформациям. Однако одновременно с этим снижается индукция насыщения.

Недостатки:

1. Необходимость использования высоких давлений при прессовании ограничивает допустимые формы изделий только тороидом.

Преимущества:

1. Очень высокая температурная стабильность.

2. Высокая запасаемая энергия на единицу объема.

3. Возможность получения марок материалов с небольшим шагом по проницаемости.

4. Наиболее низкие среди порошковых материалов потери.

5. Стабильность по отношению к изменению величины магнитного потока через материал [5].

Ферриты – соединения оксида железа с оксидами других металлов, например, Cu, Zn, Mg, Ni, Fe, Co и Mn. В отличие от порошковых сердечников ферриты представляют собой монолитные материалы. Чаще всего применяются ферриты следующих типов:

– марганцево-цинковый феррит;

– никель-цинковый феррит;

– магний-марганцевый феррит.

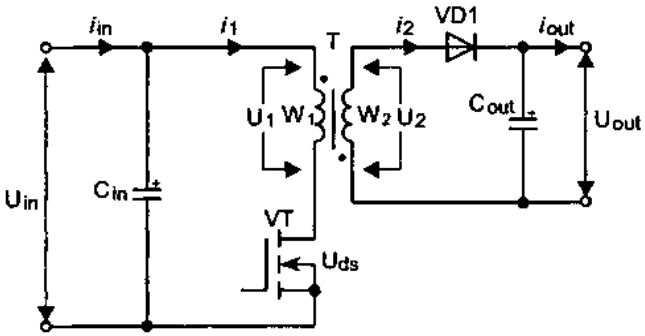
Ферриты имеют высокое удельное электрическое сопротивление порядка $10–10^9$ Ом·см и благодаря этому низкие потери на вихревые токи. Индукция насыщения составляет приблизительно 20–25 % от индукции насыщения железа.

Марганец-цинковые ферриты по сравнению с никель-цинковыми имеют меньшие потери.

Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости одной из важнейших характеристик является тангенс угла потерь tg$d$. Благодаря низкой проводимости составляющая потерь на вихревые токи в ферритах практически мала, и ею можно пренебречь. В слабых магнитных полях незначительными оказываются и потери на гистерезис. Для оценки допустимого частотного диапазона, в котором может использоваться данный материал, вводят понятие критической частоты $f_{кр}$. Обычно под $f_{кр}$ понимают такую частоту, при которой tg$d$ достигает значения 0,1 [6].

Для того чтобы сравнить два материала для сердечников трансформаторов источников питания, будем считать, что данные трансформаторы будут работать в источнике питания, построенном по топологии обратноходового преобразователя.

Обратноходовой преобразователь – одна из топологий однотактных импульсных преобразователей, в которой фазы накопления и отдачи энергии трансформатором разделены во времени (энергия отдается трансформатором в нагрузку во время обратного хода, отсюда и название Fly Back).



Обратноходовой преобразователь

В первой фазе – накопления энергии – транзистор открывается и в трансформаторе, как в дросселе, накапливается энергия. Напряжение с вторичной обмотки приложено к диоду VD1 в обратном направлении и поэтому ток в выходной цепи поддерживается только конденсатором Cout.

Во второй фазе – передачи энергии – транзистор закрывается, ток через первичную обмотку прекращается, и напряжение на W_2 меняет полярность. Диод открывается, и трансформатор сбрасывает накопленную энергию в нагрузку. Вообще флайбэк может выдать на выходе напряжение, ограниченное только утечками, при отсутствии нагрузки.

К плюсам флайбэк относятся:

– принципиально ограниченная передаваемая мощность – поэтому режим КЗ большинству флайбэков не вреден;

– простота схемы – при малых мощностях (до 50–200 Вт) оказываются самыми дешевыми схемами.

Минусы:

– трансформатор работает в режиме дросселя – потому его габариты больше, чем в схемах с нормальным трансформатором;

– трансформатор работает в режиме однополярных токов и потому требует введения зазора или сердечника из специального материала (микропорошковые и подобные, обычно кольца) [7].

Описание эксперимента

Для сравнения выберем марку феррита 2000НМ1 ПЯ0.707.094ТУ и магнитодиэлектрик МП-140 ПЯ0.707.180ТУ и рассчитаем трансформаторы с применением данных материалов, в результате чего определим материал, оптимальный в условиях приоритета меньших массогабаритных характеристик.

Для расчета необходимо задаться некоторыми начальными условиями, одинаковыми для сравниваемых трансформаторов: входное напряжение ($U_{вх}$ = 100 В), выходное напряжение ($U_{вых}$ = 6 В), максимальный выходной ток ($I_{вых}$ = 1,44 А), частота преобразования (f = 200 кГц), индуктивность первичной обмотки (L_{pri} = 350 мкГн), ток первичной обмотки ($I_{вх}$ = 0,18 А).

Методика расчета

Магнитные материалы имеют одну очень важную характеристику – индукцию насыщения. Она определяется как значение магнитной индукции, после которого, при увеличении напряженности магнитного поля в два раза, прирост индукции составит не более 5 % [1].

В зависимости от режима работы трансформатора можно рассчитать его максимальную индукцию при зданных параметрах. Для безопасной работы трансформатора она должна находиться на уровне половины индукции насыщения. Данная мера помогает предотвратить и не допустить катострофические последствия от нагрева трансформатора, к которому приведет пренебрегание данным правилом.

Феррит 2000НМ1 имеет индукцию насыщения B_{sat} = 0,38 Тл [2], при этом максимальная индукция используемого феррита не должна превышать половины данного значения B_{max} = 0,19 Тл.

Выберем размер сердечника из данного материала и, рассчитав параметры первичной обмотки, убедимся, что индукция насыщения при этом не превышает максимального значения.

Рассчитаем число витков первичной обмотки для сердечника типоразмером К4×2,5×1,2 по формуле (1):

$$N = \sqrt{\frac{L_{pri}}{A_L}}, \quad (1)$$

где A_L – коэффициент индуктивности (для сердечника данного типоразмера составляет 0,237 мкГн/вит).

В результате расчета число витков первичной обмотки составило 38.

Для того чтобы рассчитать максимальную индукцию, для начала необходимо рассчитать площадь поперечного сечения по формуле (2):

$$A_c = h\frac{D-d}{2}, \quad (2)$$

где h – высота сердечника (для сердечника данного типоразмера составляет 1,2 мм); D – внешний диаметр сердечника (для сердечника данного типоразмера составляет 4 мм); d – внутренний диаметр сердечника (для сердечника данного типоразмера составляет 2,5 мм).

В результате расчета площадь поперечного сечения сердечника составила 0,0000009 м^2.

Рассчитаем максимальную индукцию по формуле (3):

$$B_{\text{мах}} = \frac{V_{cc}}{4 \cdot f \cdot N_{pri} \cdot A_c}, \quad (3)$$

где V_{cc} – напряжение первичной обмотки (100 В); f – частота преобразования (200 кГц); N_{pri} – число витков первичной обмотки (38 витков).

В результате расчета N_{pri} составило 3,65 Тл, что намного превышает допустимое значение индукции, следовательно, данный сердечник не подходит.

Аналогичным образом рассчитаем и другие типоразмеры сердечников, до тех пор пока значение максимальной индукции не будет менее допустимой величины. Данные сведем в табл. 1.

В ходе расчетов было выяснено, что ближайший подходящий по параметрам сердечник имеет типоразмер К28×16×9, масса которого 19 грамм.

Аналогичным образом рассчитываем для сердечников из пермаллоя МП-140. Результаты сведем в табл. 2.

Необходимо отметить, что для магнитодиэлектрика марки МП-140 индукция насыщения составлет 0,75 Тл [4], что больше индукции насыщения феррита почти в два раза. Из этого следует, что максимальная индукция не должна превышать 0,37 Тл.

Таблица 1. **Рассчитанные параметры феррита 2000НМ1**

Типоразмер сердечника	N_{pri}	B_{max}, Тл	A_c, м^2	Масса, г
К4×2,5×1,2	38	3,65	0,0000009	0,05
К5×3×1,5	33	2,5	0,0000015	0,1
К7×4×2	27	1,54	0,000003	0,3
К10×6×3	23	0,9	0,000006	0,8
К10х6х4,5	19	0,73	0,000009	1,2
К12×5×5,5	13	0,5	0,00001925	2,6
К12×8×3	26	0,8	0,000006	1,12
К16×10×4,5	20	0,46	0,0000135	3
К17,5×8,2×5	15	0,358	0,00002325	4,9
К20×10×5	16	0,3125	0,0025	6,1
К20×12×6	16	0,32	0,000024	6,5
К28×16×9	13	0,18	0,000054	19

Таблица 2. **Рассчитанные параметры магнитодиэлектрика МП-140**

Типоразмер сердечника	N_{pri}	B_{max}, Тл	A_c, м^2	Масса, г
К7×4×3	95	0,292	0,0000045	0,85
К10х6х3	93	0,22	0,000006	1,5
К10×6×4,5	76	0,18	0,000009	2,2
К12×5×5,5	53	0,122	0,00001925	4,5
К13×7×5	64	0,13	0,000015	4
К15×7×4,8	63	0,1	0,0000192	5

Как видно из табл. 2, данному условию удовлетворяют сердечники всех типоразмеров. В таком случае выбор сердечника относительно заданных параметров будет происходить по внутреннему диаметру сердечника. Выбирается такой сердечник, внутренний диаметр которого позволит намотать первичную и вторичную обмотки трансформатора.

Произведем приблизительный расчет трансформаторов на двух разных сердечниках. Выбираем ферритовый сердечник типоразмером К28×16×9, и сердечник из магнитодиэлектрика типоразмером К15×7×4,8.

Рассчитаем трансформатор на ферритовом сердечнике.

Первоначально рассчитаем сечение провода первичной катушки по формуле (4):

$$D_w = 1{,}13\sqrt{\frac{I}{J}}, \tag{4}$$

где I – ток первичной обмотки (0,18 А); J – плотность тока (4 А/мм^2);

Минимальный диаметр провода составил 2,239 мм. Выбираем ближайшее большее значение провода марки ПЭТВ-2 ТУ16-502.003-82. Его диаметр с учетом изолирующего слоя составил 0,3 мм.

По формуле (5) рассчитаем массу первичной обмотки:

$$m_{pri} = \pi\sqrt{(h + D_w)^2 + \left(\frac{D_w}{2}\right)^2}\, N \cdot m', \tag{5}$$

где m' – масса 1 мм провода ПЭТВ-2 ТУ16-502.003-82 (0,0004572 гр).

Масса первичной обмотки составила 0,036 г.

Расчет индуктивности вторичниой обмотки произвдится по формуле (6):

$$L_{\text{sec}} = \frac{(V_{out} + V_D)t_{off}^2 \cdot f_{\min}}{2I_{out\,\max}}, \tag{6}$$

где V_{out} – выходное напряжение (6 В); V_D – падение напряжения на выходном диоде (0,5 В); t_{off} – время, когда ключ разомкнут (для флайбэк-преобразователей рассчитывается по формуле (7) [3]); $f_{\min}$ – минимальная частота преобразования (200 кГц); $I_{out\,\max}$ – максимальный ток на выходе (1,44 А).

$$t_{off} = \frac{1 - \partial_{\max}}{f}, \tag{7}$$

где $\partial_{\max}$ – рабочий цикл (0,5).

По формуле (6) время, в течение которого ключ разомкнут, составило 2,5 микросекунд. Тогда индуктивность вторичной обмотки составит 2,8 мкГн.

По формуле (1) рассчитаем число витков вторичной обмотки, получим 2 витка.

По формуле (4) рассчитаем диаметр провода вторичной обмотки, получим 0,678 мм. Выбираем ближайшее большее значение провода марки ПЭТВ-2 ТУ16-502.003-82. Его диаметр с учетом изолирующего слоя составил 0,79 мм.

Масса вторичной обмотки по формуле (5) составила 0,35 г.

Аналогичным образом проведем приблизительный расчет трансформатора на сердечнике марки МП-140. Данные внесем в сводную табл. 3.

Таблица 3. **Сводная таблица параметров трансформаторов на основе феррита и магнитодиэлектрика**

Трансформатор	N_{pri}	N_{sec}	m_{pri}, г	m_{sec}, гр	$m_{общ}$, г
2000НМ1	13	2	0,036	0,35	19,386
МП140	63	6	0,86	0,49	6,35

Таким образом, из табл. 3 видно, что разница в массе составила примерно 3 раза.

По формуле (8) рассчитаем приблизительно занимаемый объем:

$$V = 2\pi^2 Rr, \tag{8}$$

где R – радиус внутренней линии, мм, r – радиус сечения тора, мм.

Для трансформатора с ферритовым сердечником получим 7613 мм^3, для трансформатора с магнитодиэлектриком 623 мм^3.

Разница в объеме составила примерно 12 раз.

Выводы

Таким образом, по результатам работы выяснилось, что применение сердечников из магнитодиэлектрического материала в разы уменьшает массогабаритные характеристики трансформаторов, ис-

пользуемых в источниках питания, в частности и в космических аппаратах, что влияет и на общие массогабаритные размеры блоков аппаратов.

Список литературы

1. Материаловедение: технология конструкционных материалов на водном транспорте : учеб. пособие / В. П. Горелов, С. В. Горелов, В. Г. Сальников, Л. И. Сарин. – М. : Директ медиа, 2015. – 316 с.

2. *Матвеев, Г. А*. Катушки с ферритовыми сердечниками / А. Г. Матвеев, И. В. Хомич. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1967. – 64 с.

3. *Браун, М.* Источники питания. Расчет и конструирование. – Киев : МК-ПРЕСС, 2007. – 288 с.

4. *Семенов, Б. Ю.* Силовая электроника: профессиональные решения. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2011. – 416 с.

5. Пермаллой [Электронный ресурс] // megabook.ru. Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия. – URL: megabook.ru/arcticle/Пермаллой (дата обращения: 25.10.2017).

6. Ферриты. Химический состав [Электронный ресурс] // Studfiles.ru. Файловый архив для студентов. – URL: htps://studfiles.net/preview/6216971/page:2/ (дата обращения: 25.10.2017).

7. Блок питания на Tiny Switch [Электронный ресурс] // we.easyelectronics.ru. Электроника для всех. – URL: http://we.easyelectronics.ru/blog/power-electronics/743.html (дата обращения: 5.11.2017).

I. V. Manchenko, student
E-mail: manchenko_ilya@mail.ru
I. S. Marchenko, student
E-mail: IlyaZiU682@yandex.ru
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
E-mail: GL@idz.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Comparison of Magnetic Cores Used in Transformers of Space Electronics Power Supplies

Abstract. The article represents comparative analysis of ferrite cores and magnetic insulators used in switching power supplies of space electronics. Weight and size parameters are comparatively evalueated by means of calculations.

Keywords: ferrite, Mo-permalloy, DC-DC Converter, power supply, flyback transformer.

УДК 621.3.011

Р. Р. Мукминов, студент
E-mail: mukminovrustam17@gmail.com
А. Н. Михайлов, студент
E-mail: smihailo.1998@gmail.com
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ реакции пассивной RC-цепи и ее передаточной функции во временной области на заданное воздействие с применением онлайн-системы SystemVision

В статье представлена обзорная информация возможностей онлайн-системы SystemVision вычислять реакцию линейной системы, заданной в виде пассивной RC-цепи и ее передаточной функции, во временной области.

Ключевые слова: SystemVision, структурная схема, временная область, передаточная функция, входной сигнал, выходной сигнал.

Введение

В настоящее время на рынке существует множество программ, позволяющих получать различные временные характристики цепи, но большинство из них дорогостоящие и недоступны. Онлайн-система SystemVision – это бесплатный аналог, свободно распространяемый инструмент моделирования и проектирования аналоговых, цифровых и мехатронных систем (SystemVision® Cloud. URL: https://systemvision.com/ (дата обращения: 12.02.2018)). Для работы необходим только ПК с доступом в интернет, все вычисления проводятся онлайн.

Постановка задачи

Построение пассивной *RC*-цепи (рис. 1) и ее структурной схемы в виде передаточной функции [1, 2]. Подача одного и того же сигнала на эти цепи (рис. 2) и, соответственно, сравнение выходного сигнала этих схем [3].

© Мукминов Р. Р., Михайлов А. Н., Глушков В. А., 2018

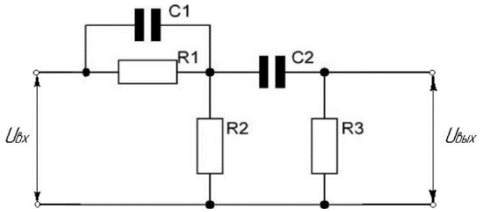


Рис. 1. Анализируемая пассивная *RC*-цепь

Параметры элементов: *R*1 = 0,7 МОм; *R*2 = 0,3 МОм; *R*3 = 0,7 МОм; *C*1 = 0,3 мкФ; *C*2 = 0,7 мкФ.

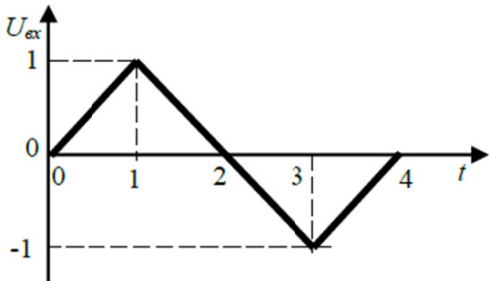


Рис. 2. Заданный входной сигнал

Передаточная функция цепи на рис. 1:

$$W(p) = \frac{0,03087\,p^2 + 0,147\,p}{0,03087\,p^2 + 0,7\,p + 1}. \qquad (1)$$

Анализ реакции пассивной RC-цепи во временной области на заданное воздействие

1. *RC*-цепь в SystemVision (рис. 3) моделируется с помощью создания ее электрической принципиальной схемы в графическом редакторе системы с заданием необходимых значений параметров элементов.

2. Входной сигнал (рис. 2) задается по точкам в виде ломаной линии в параметрах источника напряжения (рис. 4).

3. Задается временной интервал моделирования (в данном случае 7 секунд) (рис. 5).

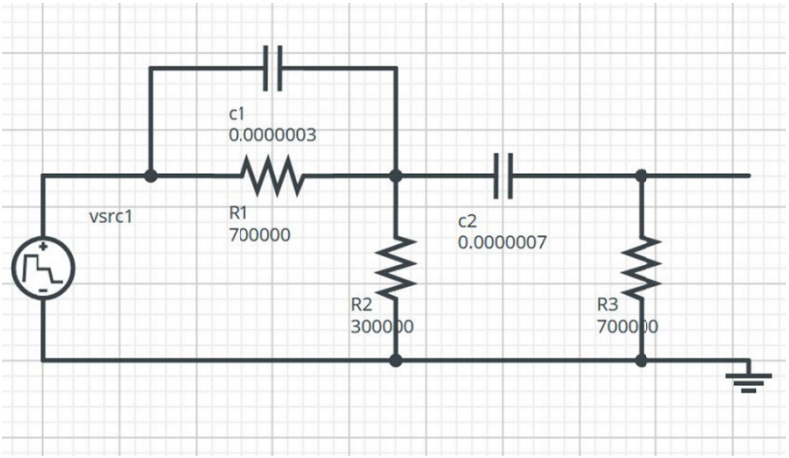


Рис. 3. RC-цепь, построенная в SystemVision

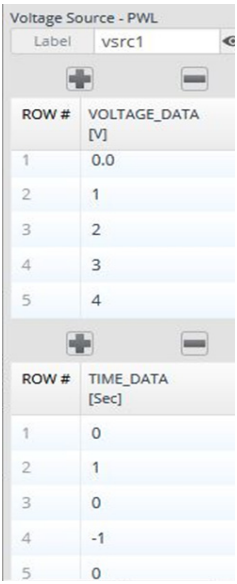


Рис. 4. Задание входного сигнала с помощью координат

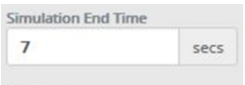


Рис. 5. Задание временного интервала моделирования

4. Результат моделирования визуализируется непосредственно на схеме (рис. 6).

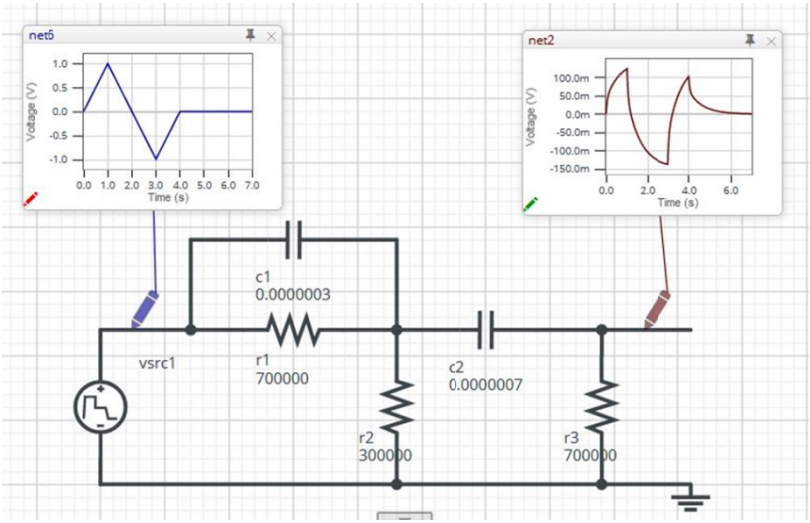


Рис. 6. Результат моделирования электрической схемы

Анализ реакции структурной схемы во временной области на заданное воздействие

1. SystemVision также позволяет производить моделирование линейных систем, заданных с помощью дробно-рациональных передаточных функций. Для RC-цепи, приведенной на рис. 1, это будет функция (1). Такая модель приведена на рис. 7.

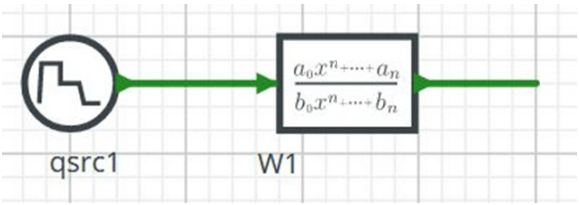


Рис. 7. Модель в виде структурной схемы на основе передаточной функции

2. В окне свойств задаются коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции (рис. 8).

3. Входной сигнал (рис. 2) и период моделирования задается так же, как и в предыдущем случае.

4. Результат моделирования также визуализируется непосредственно на схеме (рис. 9).

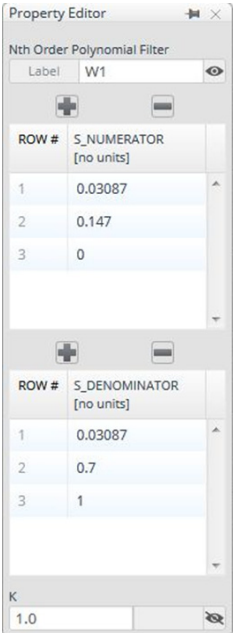


Рис. 8. Задание коэффициентов передаточной функции

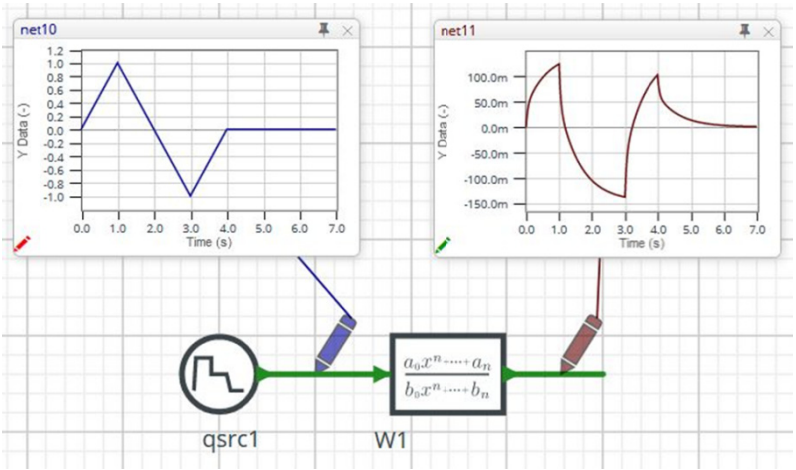


Рис. 9. Результат моделирования структурной схемы

Результаты

Было проведено схемотехническое и структурное математическое моделирование одной и той же пассивной частотно-зависимой цепи. Моделирование реакции системы в обоих случаях дало идентичные результаты, что говорит об эффективной реализации данных способов задания моделей электронных цепей в SystemVision.

Вывод

Отмечено высочайшее удобство создавать модели динамических систем в виде структурных и электрических принципиальных схем, а также проводить их имитационное моделирование с помощью онлайн-системы SystemVision. Она обладает множеством достоинств: высокое быстродействие, нетребовательность к вычислительным мощностям аппаратной платформы, а также к виду операционной системы; пользовательский интерфейс системы интуитивно понятный и удобный. Система является эффективным инструментом для преподавателей и студентов, изучающих дисциплины в таких областях, как электроника, схемотехника, теория управления и т. д.

Список литературы

1. *Чижма, С. Н.* Основы схемотехники : учеб. пособие для вузов. – Омск : Апельсин, 2008. – 424 с.

2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 448 с.

3. *Дахнович, А. А.* Радиотехнические цепи и сигналы. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2009. – 176 с.

R. R. Mukminov, student
E-mail: mukminovrustam17@gmail.com
A. N. Mikhailov, student
E-mail: smihailo.1998@gmail.com
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Online Analysis of Time-Domain Response of a Passive RC Circuit and Its Transfer Function to the Specified Input Using SystemVision

The article represents an overview of the capabilities of SystemVision to calculate the time-damain response of a linear system represented in the form of a passive RC circuit and its transfer function.

Keywords: SystemVision**,** structural diagram, time domain, transfer function, input signal, output signal.

УДК 621.383

А. Ю. Печенкин, канд. техн. наук, доцент
E-mail: alexpu81@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Оценка требуемых вычислительных ресурсов для реализации алгоритмов обработки изображений с неохлаждаемых микроболометрических матриц

В работе проводится анализ параметров изображения, получаемого неохлаждаемой микроболометрической матрицей, в аспекте его обработки с помощью цифровых средств с минимизацией энергопотребления и повышения качества процесса. Обоснована комбинация обработки с помощью ПЛИС и софт-процессора.

Ключевые слова: микроболометрическая матрица, программный алгоритм обработки, ПЛИС, логический блок.

Введение

В настоящее время в связи с развитием технологий активно стали внедряться тепловизионные приборы как гражданского, так и военного применения [1–3]. Известно [4], что сенсоры современных видеокамер воспринимают излучение ближнего ИК-диапазона, благодаря чему реализуется так называемый «ночной» режим работы видеокамеры, позволяющий получать изображение в условиях низкой освещенности. Однако для удовлетворительного качества изображения таким камерам все-таки требуется подсветка. Видеокамеры среднего LWIR-диапазона основаны на микроболометрических матрицах. Они не требуют дополнительной подсветки и позволяют эффективно воспроизводить тепловую картину для температур выше 0 градусов Цельсия. Однако в связи с технологическими особенностями и особенностями свойств применяемых материалов сенсоры LWIR-диапазона обладают рядом особенностей, не присущих сенсорам видимого диапазона:

– малая амплитуда сигнала;

– большой разброс начальных смещений сигнала различных пикселей сенсора;

© Печенкин А. Ю., 2018

– наличие «нерабочих» пикселей;

– разброс амплитуд сигнала различных пикселей при одинаковом входном воздействии.

В связи с этим при формировании изображения с помощью LWIR-сенсоров требуется дополнительная математическая обработка сигнала. Алгоритмы контрастирования и фильтрации, например, описаны в [5].

Решение задачи

На отечественном процессоре 1892ВМ5Я были программно реализованы алгоритмы фильтрации изображения с матрицы размером 256×256 пикселей [6].

Поскольку современные требования к видеокамерам LWIR диапазона достаточно высоки (размер матрицы 640×480 пикселей и выше, частота кадров – не менее 50 Гц), в целях увеличения производительности, снижения энергопотребления и улучшения соотношения сигнал/шум изображения произведена оценка требуемых ресурсов для реализации алгоритмов обработки сигнала с LWIR-сенсора в программируемой логической интегральной схеме.

Очевидно, что в связи с современными требованиями к интерфейсу управления изображением, реализацией пользовательских функций полностью обработку информации на логике реализовывать не целесообразно. Поэтому было решено в логике реализовать только самые ресурсоемкие вычислительные операции. А интерфейс и не критичные ко времени вычислительные операции реализовать на софт-процессоре программно.

В качестве сенсора была выбрана матрица Dali technology DLD640, имеющая разрешение 640×480 пикселей и обеспечивающая частоту кадров 50 Гц. Сенсор имеет 2 аналоговых выхода, позволяющих за один такт выдавать сигнал одновременно 2 пикселей, и при частоте пикселей 8,33 МГц позволяет реализовать частоту кадров 50 Гц.

Схема обработки изображения показана на рис. 1.

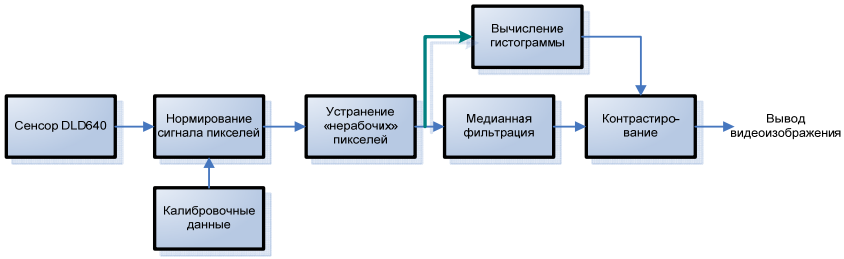


Рис. 1. Схема обработки изображения

Поскольку, как уже было сказано, пиксели имеют большой разброс начального смещения и амплитуды сигнала, очевидно, необходим блок нормирования сигнала. Предлагается нормировать сигнал пикселя следующим образом:

$$Y_{n_{корр}} = \frac{A \cdot (Y_n - Y_{n\_\min})}{Y_{n\_\max} - Y_{n\_\min}}, \quad (1)$$

где $Y_{n_{корр}}$ – скорректированное значение сигнала пикселя; Y_n – исходное значение сигнала пикселя; $Y_{n\_\min}$ – значение сигнала пикселя при минимальной температуре; $Y_{n\_\max}$ – значение сигнала пикселя при максимальной температуре.

Так как операция нормирования однотипная для всех пикселей, то целесообразно реализовать ее аппаратно, в логике ПЛИС. Полученные 16-разрядные значения сохраняются в памяти.

Устранение «нерабочих» пикселей производится путем замены нерабочего пикселя усредненным значением пикселей слева и справа от нерабочего. Эта операция тоже реализуется аппаратно.

Медианная фильтрация реализуется путем замены пикселя 3 медианой среди пикселей 1–5 (рис. 2).

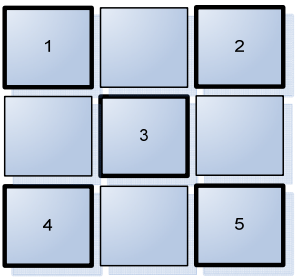


Рис. 2. Схема расположения пикселей

На основании вычисленной гистограммы формируются значения $Y_{\max}$ и $Y_{\min}$, которые используются для операции контрастирования:

$$Y_{out\_n} = \frac{256 \cdot (Y_{n_{корр}} - G_{\min})}{G_{\max} - G_{\min}}, \quad (2)$$

где Y_{out_n} – значение сигнала пикселя на выходе видеокамеры; $G_{\max}$ – максимальное значение яркости, согласно гистограмме; $G_{\min}$ – минимальное значение яркости, согласно гистограмме.

Контрастирование производится также аппаратно, непосредственно при выводе изображения.

Исходя из предложенной структуры, необходимые ресурсы могут быть оценены так.

Для реализации операции нормирования необходим 1 умножитель 16×16 бит, 1 делитель 32-разрядных чисел и память калибровочных коэффициентов, объем которой может быть вычислен как

$$Q = n \cdot 2 \cdot N_{pix}, \quad (3)$$

где Q – необходимый объем памяти, n – количество байт в коэффициенте (равно 2), N_{pix} – количество пикселей матрицы, равно 640 · 480 = = 307200.

Итого для операции нормирования нужна память коэффициентов 307200 · 2 · 2 = 1228800 байт.

Память такого объема присутствует только на дорогих ПЛИС большой логической емкости, поэтому разумно использовать внешнюю память коэффициентов.

Умножитель 16×16 бит на ПЛИС Intel занимает 1 DSP – блок 18×18.

32-разрядный делитель на ПЛИС Intel занимает порядка 900 логических ячеек.

Аналогично определяем, что для реализации замены нерабочих пикселей требуется 1 DSP-блок 18×18 и память объемом 307200 бит (или 38400 байт); для аппаратной реализации операции контрастирования требуется 1 DSP-блок 18×18 и порядка 900 логических ячеек.

Для реализации медианного фильтра требуется буферная память на 3 строки, то есть $640 \cdot 3 = 1920$ слов, или $1920 \cdot 2 = 3840$ байт (для 16-разрядных слов), и порядка 600 логических ячеек.

Кроме того, для реализации функции усреднения по кадрам требуется память большого объема – порядка 1 Мбайт для хранения нескольких кадров. Очевидно, что память такого объема, исходя из цены, размеров, потребления целесообразно выбрать динамическую, например, SDRAM или DDR. Это требует реализации контроллера динамической памяти в ПЛИС. В ПЛИС Intel такой контроллер занимает порядка 1500 логических ячеек.

Реализация функций управления, разветвленных вычислительных алгоритмов, функций интерфейса требует наличия процессора. Очевидно, что для этих целей подойдет софт-процессор, например, NIOS II. С требуемой производительностью такой процессор занимает примерно 3000 логических блоков ПЛИС.

Выводы

Итак, для реализации функций обработки изображения с LWIR – сенсора требуется:

– порядка 7000 логических блоков;
– 2 DSP-блока 18×18;
– порядка 4000 байт в блоках памяти ПЛИС;
– порядка 1200 кбайт внешней памяти ОЗУ;
– порядка 1300 кбайт внешней памяти ПЗУ.

Учитывая вышеперечисленные требования, для реализации всех функций вполне подойдет чип Intel семейства Cyclone 4 или Cyclone 10 логической емкостью 10 000 логических блоков.

Для специальных применений возможна реализация алгоритмов обработки на отечественных ПЛИС, например, 5578ТС024.

Список литературы

1. *Рудаков, Б. В.* Возможности применения тепловизионных приборов в правоохранительной деятельности // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 13. – С. 531–535. – URL: http://e-koncept.ru/2015/85107.htm (дата обращения: 01.03.2018).

2. Применение тепловизора [Электронный ресурс] // РУСГЕОКОМ. – URL: http://www.rusgeocom.ru/primenenie-teplovizora (дата обращения: 01.03.2018).

3. *Ковчавцев, А. П.* Тепловизор: лучше один раз увидеть // Наука из первых рук. – 2012. – № 5 (47). – С. 34–43.

4. *Лесничий, В. В.* Методика измерения спектральных характеристик матричных приемников любительских и профессиональных фотокамер и их применение для задач цифровой голографии / В. В. Лесничий, Н. В. Петров, П. А. Черёмхин // Оптика и спектроскопия. – 2013. – № 4 (115). – С. 633–643.

5. *Бондина, Н. Н.* Адаптивные алгоритмы фильтрации и изменения контраста изображений / Н. Н. Бондина , Р. Ю. Мураров // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 35 (1078). – С. 35–42.

6. Алгоритмы цифровой обработки тепловизионных изображений в реальном времени на базе сигнальных процессоров «Мультикор» / К. О. Болтарь, Р. В. Грачев, В. В. Полунеев, В. С. Рудневкий // Успехи прикладной физики. – 2013. – № 1 (1). – С. 75–81.

A. Yu. Pechenkin, CSc in engineering, associate professor
E-mail: alexpu81@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Estimation of Computational Capabilities Needed for Algorithms of Image Processing for Uncooled Micro-Bolometric Matrices

The paper considers analysis of parameters of the image acquired from the uncooled micro-bolometric matrix in terms of its digital processing with minimized power consumption and enhanced quality. A combination of processing based on FPGA and software processor is justified.

Keywords: micro-bolometric matrix, processing software algorithm, FPGA, logic block.

УДК 621.396.6

Е. В. Симкина, Ю. А. Первякова, Э. В. Порошин, магистрант
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, проф.
К. О. Максимов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: k.simkina1994@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Опыт изготовления многослойных толстопленочных элементов со структурой слоев R-C-NR

Проанализировав опыт изготовления элементов со структурой слоев «резистор-диэлектрик-резистор», было выявлено, что изготовление таких структур требует дополнительной отработки технологического процесса с учетом влияния изготовления последующих слоев на нижний резистивный слой.

Ключевые слова: толстопленочная технология, структура слоев R-C-NR, резистор-диэлектрик-резистор, резистивный слой, вжигания паст, метод трафаретной печати.

Введение

На кафедре «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» были разработаны новые пассивные элементы с фрактальным импедансом в виде многослойной пленочной структуры «резистор-диэлектрик-резистор». Было принято решение изготовить опытные образцы этих элементов по интегральной толстопленочной технологии.

В основе толстопленочной технологии лежит использование недорогих и высокопроизводительных процессов, требующих небольших единовременных затрат на подготовку производства, благодаря чему она оказывается экономически целесообразной и в условиях мелкосерийного производства [1].

Проблема состоит в том, что до сих пор никто не изготавливал толстопленочные структуры «резистор-диэлектрик-резистор», поскольку в этом не было необходимости. Поэтому неизвестно, как будут ме-

© Симкина Е. В., Первякова Ю. А., Порошин Э. В., Ушаков П. А., Максимов К. О., 2018

няться удельные параметры слоев при многократном температурном воздействии.

Целью данной работы является анализ изменения удельных сопротивлений верхнего и нижнего резистивных слоев при изготовлении толстопленочной структуры при использовании различных видов паст.

Описание эксперимента

На рис. 1 изображена последовательность слоев многослойной структуры вида «резистор 1-диэлектрик-резистор 2» (R-C-NR). Здесь допечатный слой выполняется из пасты 1130 и предназначен для подготовки дальнейшего нанесения слоев.

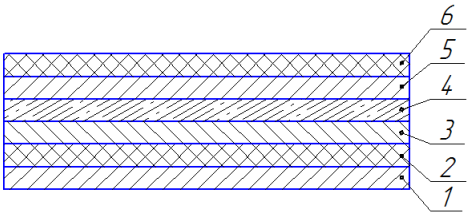


Рис. 1. Структура слоев R-C-NR: *1*, *5* – проводники, контактные площадки; *2* – 1-й резистивный слой; *3* – межслойная изоляция; *4* – допечатный слой; *6* – 2-й резистивный слой

Поскольку изготовление многослойной толстопленочной структуры производится впервые, то была использована стандартная технология, принятая на предприятии.

В зависимости от назначения пленок подбирается определенная паста, состав которой определяет физические (электрические, тепловые) и технологические свойства элементов. Для изготовления элементов были подобраны следующие пасты, представленные в табл. 1.

Таблица 1. **Характеристики отдельных слоев**

Номер слоя	Наименование слоя	Марка	Электрические характеристики
1	Проводники, контактные площадки	1130	0,035 Ом/□
2	Резистивный слой 1	3130	10^3 Ом/□
3	Межслойная изоляция	6010	$R_{из} \geq 10^8$ Ом
4	Допечатывающий слой	1130	0,035 Ом/□
5	Проводники, контактные площадки	1130	0,035 Ом/□
6	Резистивный слой 2	3136	$6 \cdot 10^3$ Ом/□

Подобранные пасты прошли контроль текучести, который осуществлялся стандартным методом сжатия пасты между стеклами.

Каждый слой определенной пасты наносился путем экструзии пасты через трафарет на установке «Тропа-1» [3] при следующих характеристиках:

- материал для изготовления трафарета – нейлон;
- тип трафарета – сетчатый;
- размер ячеек сетки 40 мкм;
- зазор между трафаретом и подложкой 1,5 мм;
- скорость рабочего хода ракеля достигает 10–80 мм/с;
- угол наклона между рабочей плоскостью ракеля и трафаретом составляет 60 °;
- давление ракеля составляет 146 кгс/см^2;
- материал подложки - керамика ВК94.

После нанесения пасты на керамическую подложку необходимо, с целью выравнивания следов сетки и усадки пасты, выдержать при температуре (25±5) °С в течение 10 минут. Вжигание паст производилось в высокотемпературной печи серии ПЭК-8 с соблюдением температурного режима, представленного температурным профилем, изображенным на рис. 2 [2].

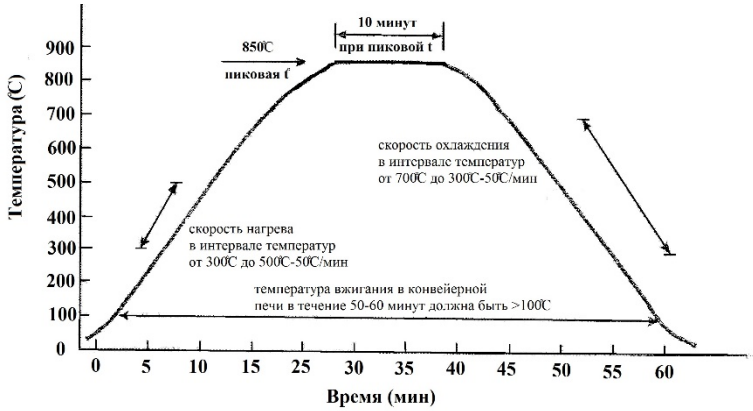


Рис. 2. Температурный цикл вжигания паст в печи ПЭК-8

После нанесения и вжигания первого проводникового слоя (паста серии 1130) и первого резистивного слоя (паста серии 3100) произведен контроль номиналов резисторов R1-R4, которые являются контрольны-

ми однородными R-C-NR элементами с распределенными параметрами на нижнем слое. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Результаты измерений сопротивлений контрольных резисторов R1-R4 из пасты 3130**

R1 = R2 = R3 = R4	Согласно КД
8 кОм ± 20 %	8 кОм ± 20 %

После последовательного нанесения и вжигания последующих паст изоляционного слоя (паста серии 6010), допечатного слоя (паста серии 1130), второго изоляционного слоя (паста серии 6010), второго допечатного слоя (паста серии 1130), второго проводникового слоя (паста серии 1130) и второго резистивного слоя (паста серии 3100) вновь произведен контроль номиналов резисторов R1-R4, а также контроль номиналов резисторов R5-R8, которые являются контрольными однородными R-C-NR элементами с распределенными параметрами на верхнем слое. Полученные результаты представлены в табл. 3. Дополнительно были нанесены второй допечатный слой и второй проводниковый слой в связи с необходимостью увеличения толщины слоя, который должен быть не менее 35 мкм.

Таблица 3. **Результаты измерений сопротивлений контрольных резисторов R1-R4 из пасты 3130, R5-R8 из пасты 3136.**

R1, R2, R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД
~50 кОм и выше	8 кОм ± 20 %	~150 кОм и выше	48 кОм ± 20 %

После вжигания второго резистивного слоя наблюдается отклонение значений сопротивлений резисторов R1-R4. Значения увеличились больше чем в 6 раза. Значения резисторов R5-R8 увеличились больше чем в 3 раза (табл. 3).

В качестве эксперимента было произведено дополнительное вжигание, без нанесения дополнительных слоев. Произведен контроль номиналов резисторов R1-R4, R5-R8. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. **Результаты измерений сопротивлений контрольных резисторов R1-R4, R5-R8 при дополнительном вжигании**

R1, R2,R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД
~50 кОм и выше	8 кОм ± 20 %	~139 кОм и выше	48 кОм ± 20 %

После дополнительного вжигания значения номиналов резисторов R1-R4 незначительно увеличились, а номиналы резисторов R5-R8 стали уменьшаться, но также увеличены примерно в 3 раза.

Для сравнения второй резистивный слой следующих паст был сформирован из паст согласно табл. 5.

Таблица 5. **Марки паст с их электрическими характеристиками для вжигания второго резистивного слоя (R5-R8)**

Марка пасты	Электрические характеристики
3133	3000 Ом/□
3142	20000 Ом/□
3140	10000 Ом/□

Был произведен контроль номиналов резисторов R1-R4, R5-R8. Полученные результаты представлены в табл. 6–8.

Таблица 6. **Значения сопротивлений контрольных резисторов R1-R4, сформированных из пасты 3130, и резисторов R5-R8, сформированных из пасты 3133**

R1, R2, R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД	Паста
~ 42 кОм	8 кОм ± 20 %	~ 60 кОм	48 кОм ± 20 %	3133

После вжигания второго резистивного слоя пастой 3133 наблюдается увеличение значений номиналов резисторов R5, R6, R7, R8, не попадающих в поле допуска.

Таблица 7. **Значения сопротивлений контрольных резисторов R1-R4, сформированных из пасты 3130. и резисторов R5-R8, сформированных из пасты 3142**

R1, R2, R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД	Паста
~ 42 кОм	8 кОм ± 20 %	~ 350 кОм	48 кОм ± 20 %	3142

После вжигания второго резистивного слоя пастой 3142 наблюдается увеличение значений номиналов резисторов R5, R6, R7, R8 больше чем в 7 раз.

Таблица 8. **Значения сопротивлений контрольных резисторов R1-R4, сформированных из пасты 3130, и резисторов R5-R8, сформированных из пасты 3140**

R1, R2, R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД	Паста
~ 42 кОм	8кОм±20%	~ 200 кОм	48кОм±20%	3140

После вжигания второго резистивного слоя пастой 3140 наблюдается увеличение значений номиналов резисторов R5, R6, R7, R8 больше чем в 4 раза.

В качестве эксперимента для формирования второго резистивного слоя были смешаны пасты 3142 и 3140 в пропорции 1/1. Был произведен контроль номиналов резисторов R1-R4, R5-R8, полученные результаты представлены в табл. 9.

Таблица 9. **Значения сопротивлений контрольных резисторов R1-R4, сформированных из пасты 3130, и резисторов R5-R8, сформированных из паст 3142 и 3140**

R1, R2, R3, R4	Согласно КД	R5, R6, R7, R8	Согласно КД
~ 42 кОм	8 кОм ± 20 %	~ 300 кОм	48 кОм ± 20 %

После вжигания второго резистивного слоя из паст 3142 и 3140 наблюдаем, что номиналы резисторов R5, R6, R7, R8 увеличены больше чем в 6 раз.

В результате были изготовлены 10 подложек с многослойными толстопленочными элементами типа R-C-NR. Вид одной из плат представлен на рис. 3.

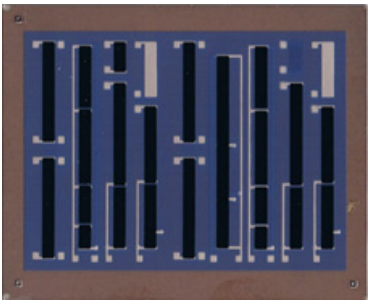


Рис. 3. Плата с многослойными толстопленочными элементами вида R-C-NR

Выводы

Таким образом, первый опыт изготовления многослойных толстопленочных структур вида R-C-NR показал, что для получения воспроизводимых результатов необходимо:

- проработать технологию изготовления многослойных толстопленочных элементов в части температурного режима вжигания слоев, чтобы нижний резистивный слой вжигался при максимальной температуре, а каждый последующий слой вжигался при более низкой температуре;
- подобрать пасты с соответствующими температурными режимами вжигания.

Список литературы

1. *Потапов, А. А.* Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике: современное состояние и развитие // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 1. – С. 1–100.

2. ТУ 003-00387275-2012 Пасты резистивные рутениевые серия 3100. Технические условия. Введ. 30.10.2012 Взам. ТУ-003-00387275-2007. – Ярославль, 2012. – 25 с.

3. *Сизов, А.* Нанесение паяльной пасты с помощью сетчатых и металлических трафаретов // Технология в электронной промышленности. – 2006. – № 4. – С. 40–43.

E. V. Simkina, Y. A. Pervyakova, E. V. Poroshin, magister students
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
K. O. Maksimov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: k.simkina1994@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Experience of Manufacturing Multilayer Thick-Film Elements with the Structure of R-C-NR Layers

Having analyzed experience of production of elements with structure of layers the resistor-dielectric-resistor it has been revealed that production of such structures demands additional working off of technological process taking into account influence of production of the subsequent layers on the lower resistive layer.

Keywords: thick-film technology, structure of layers of R-C-NR, resistor-dielectric-resistor, resistive layer, paste burning, method of a stencil process.

УДК 620.92

Е. С. Трифонова, аспирант
E-mail: anti41@mail.ru
В. А. Глушков, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Обзор ресурсов солнечной энергетики на территории г. Ижевска

На основании информации о климатических ресурсах выполнена работа по оценке эффективности использования солнечных панелей в г. Ижевске (Удмуртская Республика). Проведен расчет возможной ежемесячной выработки электроэнергии солнечными панелями.

Ключевые слова: энергетика, электроэнергия, солнечные панели, инсоляция, Ижевск.

Введение

Мы живем в эпоху, когда потребление электроэнергии увеличивается ежегодно. Это связано как с развитием техники и технологий, так и с ростом численности населения на планете. В недалеком будущем настанет момент, когда потребности человечества в электроэнергии будет сложно покрыть с помощью ископаемых традиционных видов топлива, а также когда количество выбросов от их переработки может стать критическим и нанести непоправимый вред окружающей среде. Задумываясь об экологии и энергоэффективности, стоит обратить внимание на альтернативные виды энергии, а именно на солнечную энергию.

Солнце – это мощнейший источник энергии. Один из вариантов преобразования солнечной энергии в электрическую – это использование солнечных панелей, то есть фотоэлементов. По прогнозам Международного энергетического агентства, солнечная энергетика станет основным источником электричества к середине века по причине совершенствования технологии изготовления фотоэлектрических модулей и систем, а следовательно, снижения их цены. Так, к примеру, в 2008 году в развитых странах стоимость 1 ватта, произведенного сол-

© Трифонова Е. С., Глушков В. А., 2018

нечными системами, была выше 4 долларов. Сейчас этот показатель составляет 0,8 долларов. Помимо этого, в последние годы наблюдается рост ограничений на использование традиционных видов топлива и квоты на выброс парниковых газов. Все это даст дорогу альтернативной энергетике [1].

Даже учитывая то, что Россия не является развитой страной [2] и ограничений на использование традиционных видов топлива не ожидается, все же стоит задуматься о внедрении солнечной энергетики в экономику.

Рассмотрим ресурсы солнечной энергетики в развитом промышленном центре Удмуртии и Урала – городе Ижевске.

Климатические ресурсы

Климатические ресурсы – это свойства климата, которые можно использовать в хозяйстве. Для расчета целесообразности использования солнечных панелей необходимо знание двух ресурсов – инсоляции и продолжительности солнечного сияния.

Инсоляция – это количественный показатель солнечной радиации, т. е. число единиц энергии, падающей на единицу поверхности за единицу времени. Обычно измеряют в кВт·ч/м^2/день. Величина инсоляции зависит от высоты солнца над горизонтом, географической широты места, угла наклона земной поверхности [3].

Для расчета средней ежемесячной инсоляции на территории Ижевска (рис. 1) используем данные NASA Surface meteorology and Solar Energy (The Atmospheric Science Data Center at NASA Langley Research Center) за 22-летний период (с июля 1983 г. по июнь 2005 г.) [4].

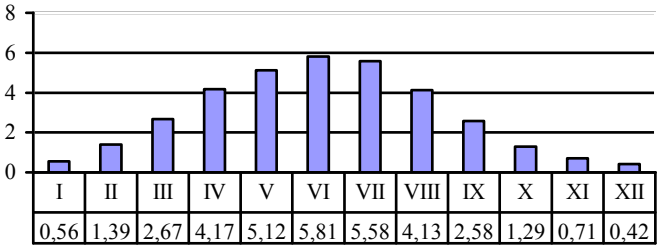


Рис. 1. Средняя ежемесячная инсоляция горизонтальной поверхности (кВт·ч/м^2/день)

Продолжительность солнечного сияния в основном зависит от широты места и возрастает с севера на юг в нашем полушарии. Однако

широтное распределение этой характеристики часто нарушается влиянием облачного покрова, обусловленного особенностями атмосферной циркуляции. Уменьшение продолжительности солнечного сияния отмечается в городах из-за наличия большого количества пыли и дыма в атмосфере, а также вследствие большой защищенности горизонта городскими постройками.

На территории Удмуртской Республики годовое число часов солнечного сияния изменяется от 1650 до 2000. Увеличение числа часов солнечного сияния происходит с севера на юго-восток. Уменьшение продолжительности солнечного сияния обусловлено в основном большей повторяемостью пасмурного состояния неба (рис. 2).

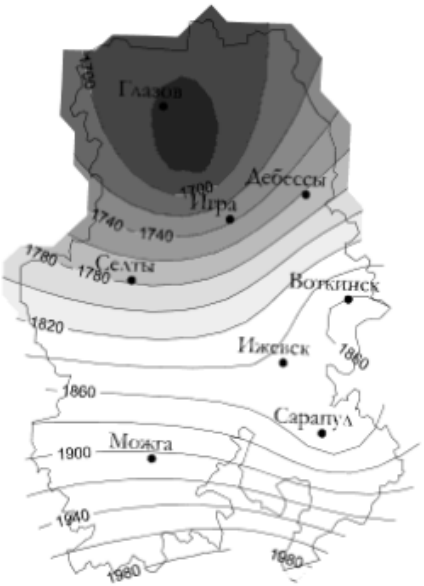


Рис. 2. Распределение среднегодовых значений продолжительности солнечного сияния (ч) [5]

Для работы солнечных панелей необходимый минимум интенсивности солнечной радиации 0,42 кВт/м^2, поэтому следует использовать в расчетах продолжительность солнечного сияния лишь с учетом данной характеристики. Такая интенсивность при условии средней прозрачности атмосферы наблюдается при высоте солнца не ниже 10°, которая достигается на широтах 50–60° с.ш. через 1–1,5 ч после вос-

хода и перед заходом [5]. На рис. 3 представлен график возможной месячной продолжительности работы солнечных панелей на территории г. Ижевска.

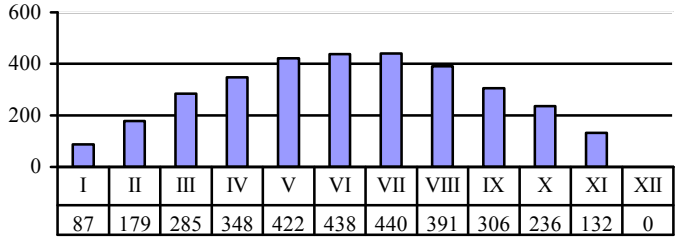


Рис. 3. Возможная месячная продолжительность работы гелиоустановок (ч) при условии безоблачного неба ($S > 0{,}42$ кВт/м^2)

Расчет выработки электроэнергии

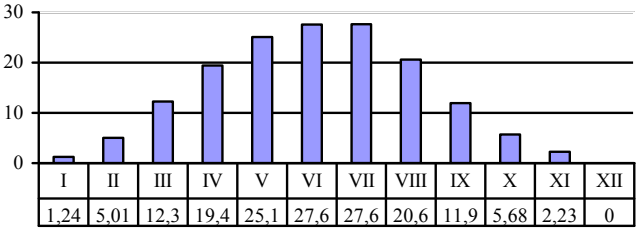
При анализе рынка отечественных производителей солнечных панелей по параметрам КПД и стоимости выбор пал на солнечные панели с монокристаллическими солнечными элементами фирмы АО «Телеком-СТВ», г. Зеленоград. Их КПД равен 19,2 %, средняя мощность солнечной панели равна 1,94 Вт/м^2, гарантийный срок – 7 лет.

Для расчета выработки солнечными панелями электроэнергии (рис. 4) используем следующую формулу:

$$Q_{мес} = I \cdot \eta \cdot n \cdot k,$$

где $Q_{мес}$ – количество энергии, выработанное 1 м^2 солнечной панели за определенный месяц, кВт·ч/м^2; I – инсоляция горизонтальной поверхности, кВт·ч/м^2/день; η – КПД солнечной панели; n – количество дней в месяце, для которого ведется расчет, дней; k – безразмерный коэффициент, характеризующий продолжительность работы солнечных панелей при условии безоблачного неба, который равен отношению возможной месячной продолжительности работы гелиоустановок при условии безоблачного неба ($S > 0{,}42$ кВт/м^2) к месячной продолжительности светового дня [6].

Тогда возможная годовая выработка энергии составит 158,61 кВт·ч/м^2. А за гарантийный срок работы элементов – 1110,27 кВт·ч/м^2.



I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1,24	5,01	12,3	19,4	25,1	27,6	27,6	20,6	11,9	5,68	2,23	0

Рис. 4. Возможная месячная выработка электроэнергии 1 м^2 солнечных элементов в Ижевске (кВт·ч/м^2)

Выводы

Расчет возможной выработки энергии солнечными панелями на территории г. Ижевска, выполненный на основе многолетних наблюдений за климатическими ресурсами местности, дает возможность оценить эффективность использования солнечных панелей. Очевидно, что максимум эффективности приходится на летние месяцы – июнь и июль. В осенне-зимний период эффективность мала. В связи с особенностями климата Удмуртской Республики, а также России в целом осенне-зимний период является более энергозатратным. Следовательно, использования традиционных видов топлива на данном этапе развития преобразователей альтернативных источников энергии не избежать.

Данный расчет будет полезен при проектировании системы электроснабжения с частичным покрытием энергопотребления альтернативными источниками энергии.

Список литературы

1. *Ведмеденко, И.* Солнечная энергетика станет основным источником электричества к середине века [Электронный ресурс] // Naked Science, Интернет-издание. – URL: https://naked-science.ru/article/sci/solnechnaya-energetika-stanet (дата обращения: 01.11.2017).

2. ООН улучшила прогноз по экономике России и стран СНГ на 2017 год [Электронный ресурс] // Информационное агентство России «ТАСС». –URL: http://tass.ru/ekonomika/4256585 (дата обращения: 06.11.2017).

3. *Бахарев, Д. В.* О нормировании и расчете инсоляции / Д. В. Бахарев, Л. Н. Орлова // Светотехника. – 2006. – № 1. – С. 18–27.

4. Surface meteorology and Solar Energy: A renewable energy resource web site [Электронный ресурс] // Atmospheric Science Data Center. – URL: https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/ (дата обращения: 06.11.2017).

5. *Николаев, А. А.* Климатические ресурсы солнечной радиации на территории Удмуртской Республики // Вестник Удмуртского университета. – 2012. – №. 4. – С. 115–121.

6. Информация о солнце в Ижевске, Россия [Электронный ресурс] // 365.wiki. – URL: http://ru.365.wiki/world/russia/izhevsk/sun/ (дата обращения: 06.11.2017).

E. S. Trifonova, postgraduate student
E-mail: anti41@mail.ru
V. A. Glushkov, CSc in engineering, associate professor, head of department
E-mail: Vladimir.Glushkov@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Overview of Solar Power Resources on the Territory of Izhevsk

The paper is devoted to evaluation of solar panels efficiency on the territory of Izhevsk (Udmurt Republic) based on the climatic resources information. Possible monthly power generation of solar panels is calculated.

Keywords: energy, electric energy, solar panels, insolation, Izhevsk.

УДК 621.316.06

П. А. Ушаков, д-р техн. наук, профессор
О. Я. Шамсиахметов, ведущий инженер-электроник
E-mail: kra_dept@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Использование методик ТРИЗ в структурном синтезе и оптимизации электронных схем

Идеальная структурная схема практически нереализуема, но с достаточной степенью приближения возможны компромиссные варианты. Задачи структурного синтеза можно решить тремя путями, используя заданную выходную характеристику. Для оптимизации схем был предложен метод, активирующий творческие способности – ТРИЗ. Разработан алгоритм выбора оптимального варианта структурной схемы, при этом были определены критерии согласованности оценки экспертных групп и однородности мнений экспертов.

© Ушаков П. А., Шамсиахметов О. Я., 2018

Ключевые слова: структурный синтез, ТРИЗ, электронная схема, критерии оценки, эвристические алгоритмы

Введение

Один ученый пришел к мудрецу с намерением тайно испытать его. Он протянул ему кулак с зажатой в нем бабочкой, сказав при этом: «Мудрейший, угадай, смерть или жизнь я держу в руке?». Если мудрец ответил бы «смерть», то ученый, раскрыв кулак, выпустил бы живую бабочку. Если бы мудрец ответил «жизнь», то ученый, сжав незаметно кулак, показал бы мертвую бабочку. Но мудрец пристально посмотрел на него и ответил: «Всё в твоих руках!»

Народная притча

Структурный синтез в электронике и радиотехнике тесно связан с проблемой структурной оптимизации. Под оптимальностью структуры электронной схемы подразумевается предположение, что электронное устройство воспроизводит заданное функциональное преобразование сигнала при реальных практических ограничениях. То есть идеальная структура практически нереализуема, но с достаточной степенью приближения возможны компромиссные варианты.

Задачи структурного синтеза можно решить тремя путями, используя заданную выходную характеристику и заранее выбранную радиоэлементную базу:

1. Подобрать (синтезировать) случайным образом подключенные друг к другу цепочки радиоэлементов различной конфигурации и проверять работоспособность каждой конструкции до получения удовлетворительного выходного результата.

2. По заданной выходной характеристике математическими методами (например символьное исчисление или матричный анализ) восстановить исходную структуру электронной схемы.

3. Используя экспертные оценки, подобрать и испытать специалистами-схемотехниками полученные структуры по имеющимся справочным базам данных.

Первый вариант обладает низкой эффективностью из-за огромного количества полученных структур, которые необходимо проанализировать, часть из которых изначально нежизнеспособна. Возможно, полученный результат будет в итоге неактуален из-за потерянного на поиск решения времени.

Второй вариант перспективен, и в этом направлении ведутся научные разработки, но на сегодняшний день он чрезвычайно трудоемок

из-за огромного количества преобразований символьных последовательностей математических моделей. Поэтому практическое использование ограничивается вычислительными ресурсами.

Третий вариант наиболее жизнеспособен, так как интуитивно понятен. В основе применяется комбинация двух методов: метод экспертных оценок и метод проб и ошибок. Однако и здесь есть вероятность получить локальный экстремум из-за инерционности человеческого мышления. Приходим к пародоксальной ситуации – чем умнее эксперты, тем больше вероятность неудач в поиске оптимальной структуры (так как каждый эксперт имеет свою жизненную школу и базу знаний, дальше которой он не видит перспектив).

Исходя из вышеизложенного был предложен метод, активирующий творческие способности (эвристический).

Авторы проанализировали мировые тенденции развития этого направления (мозговой штурм, синектика, морфологический анализ, ассоциативный метод, метод проб и ошибок) и пришли к выводу, что все это обобщено в российском методе, предложенном Г. С. Альтшуллером – теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

Данная теория предлагает алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ) и различные методики получения творческих результатов. К сожалению, в теории отсутствуют критерии оценки эффективности полученных решений, оставляя это на совести экспертных групп и приемных комиссий.

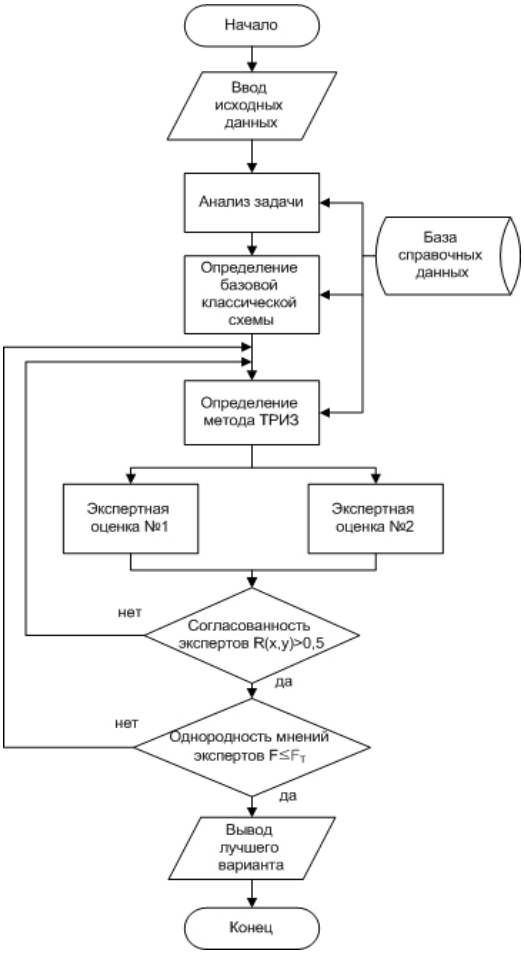
Исходя из этого был предложен следующий алгоритм оптимизации при структурном синтезе электронных схем:

1. Анализ задачи синтеза (техническое задание).
2. Разработка типового технического предложения.
3. Формулировка технического противоречия (ситуация, при которой попытка улучшить одну характеристику приводит к ухудшению другой).
4. Разрешение технического противоречия с использованием типовых приемов (методик) ТРИЗ, иначе переход к пункту 5.
5. Формулировка физического противоречия (ситуация, при которой одному объекту предъявляются противоположные требования).
6. Разрешение физического противоречия с использованием типовых приемов (методик) ТРИЗ.
7. Нахождение конкретного технического решения на базе известных типовых решений (база данных типовых заготовок (так называемые эффекты)).

Для выбора оптимальных решений будем использовать две группы экспертов, которые одинаково подготовлены и обладают одинаковыми базами данных справочно-нормативной информации.

Данные должны предоставляться для принятия решения на основе различных источников информации с учетом мирового развития структурного синтеза данного направления (аналоговое, цифровое и т. д).

Блок-схема алгоритма выбора оптимального варианта электронной схемы представлена на рисунке.



Алгоритм выбора оптимального варианта электронной схемы

Раскроем содержание некоторых элементов блок-схемы:

1. Анализ задачи.

1.1. Количественные данные, определяющие параметры схемы.

1.2. Принимаемые ограничения.

1.3. Возможные оригинальные схемы.

1.4. Разрешенная элементная база.

2. Определение базовой классической схемы.

2.1. Мировой практический опыт.

2.2. Коллективный опыт экспертов в каждой группе.

3. Определение метода ТРИЗ. Наиболее распространены перечисленные ниже типовые методы ТРИЗ.

3.1. РВС (размер, время, стоимость) – серия мысленных экспериментов, уменьшающих инерцию мышления перед началом решения (как с изменением количественного параметра от максимума до минимума меняется качество системы).

3.2. Вепольный анализ (веполь = вещество + поле) – специальный язык формул для описания любой технической системы в виде определенной (структурной) модели. Построенную модель преобразуют по специальным правилам и закономерностям, получая структурное решение задачи.

3.3. Шаг назад от идеального конечного результата (ИКР) – моделируется ситуация, когда нужное действие получается без дополнительных затрат (потерь), усложнений и нежелательных эффектов.

3.4. Диверсионный анализ (инверсионный метод) – моделируется «системная диверсия», которая поможет взломать систему, найдя в ней узкие места.

3.5. Обратить вред в пользу – необходимо устранить вредное действие объекта (или процесса).

3.6. Всё наоборот – в этом случае, если сложно произвести необходимое действие с объектом, производят противоположное действие.

3.7. Посредник – в этом случае, если сложно (или невозможно) произвести необходимые действия с объектом, то вводится посредник (промежуточный объект), с помощью которого и производят действия.

3.8. Сделать заранее – если невозможно в определенное время совершить действие с объектом, то его производят заранее.

3.9. Копирование – в случае, если сложно (или невозможно) производить необходимые действия с объектом, используют его копию, с которой производят нужное действие.

3.10. Согласование и рассогласование – в случае, если сложно произвести необходимые действия с объектом, его согласовывают/ рассогласовывают с окружающей средой.

4. Экспертная оценка.

4.1. Определение диапазонов возможных экспертных оценок в баллах:

$$x_{\min} \le x_i \le x_{\max}, \quad y_{\min} \le y_i \le y_{\max} \tag{1}$$

где x_i, y_i – начисляемые экспертами баллы в группах № 1 и № 2; $x_{\min}$, $y_{\min}$ – минимально возможные начисляемые баллы; $x_{\max}$, $y_{\max}$ – максимально возможные начисляемые баллы.

4.2. Составление оценочных таблиц в баллах по заданной характеристике (таблицы независимы и обрабатываются отдельно).

Результаты голосования экспертов представлены в таблице.

Пример оформления результатов голосования экспертов

№	Технические характеристики	Экспертная группа 1			Экспертная группа 2		
		x_1	x_2	x_n	y_1	y_2	y_n
1	Переходная характеристика						
2	Диапазон частот						
3	Источник питания						
k	……						
	Итого ∑ баллов						

5. База данных.

5.1. Информация о перспективных схемных решениях.

5.2. Информация о перспективных разработках.

5.3. Справочные данные для каждого эксперта для повышения объективности и достоверности оценки.

5.4. Критериальные оценки Пирсона и Фишера.

6. Определение согласованности оценки экспертов. Определяется по коэффициенту корреляции Пирсона:

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} ((x_i - m_1)(y_i - m_2))}{(n-1)\sqrt{D_1 \cdot D_2}}, \tag{2}$$

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - m_1)^2}{n-1},\ D_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - m_2)^2}{n-1}, \quad (3)$$

где D_1, D_2 – дисперсии для групп № 1 и № 2 соответственно; x_i, y_i – суммарная оценка i-го эксперта из групп № 1 и № 2 соответственно; m_1, m_2 – средние арифметические значения суммарных оценок экспертов групп № 1 и № 2 соответственно:

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n},\ \ m_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n}. \quad (4)\ .$$

Если критерий стремится к единице, то согласованность оценок экспертов хорошая, если критерий стремится к нулю, то согласования не наблюдается. Поэтому необходимо уточнить исходные данные и сменить методику ТРИЗ на выбранную из базы данных экспертами, которая еще не использовалась.

7. Определение однородности мнений экспертов. Оценка производится по критерию Фишера по равенству дисперсий:

$$F = \frac{D_1}{D_2} \le F_{\text{T}}, \quad (5),$$

где F_{T} – табличное критическое значение критерия Фишера из специальной таблицы базы данных при уровне значимости α и степени свободы дисперсий числителя и знаменателя (k – 1). Уровень значимости α – это вероятность отвергнуть правильную гипотезу при условии, что она верна (обычно выбирают 0,05 или 0,01).

Если неравенство (5) выполняется, то данное схемное решение принимается, если неравенство (5) не выполняется, тогда однородность мнений экспертов отсутствует и схемное решение отвергается.

При достаточном времени проведения обсуждений и принятия решений экспертными группами необходимо задействовать наибольшее количество методик ТРИЗ (в идеале все рекомендованные для оптимизации). Далее необходимо повторить алгоритм оптимизации для каждой методики до получения приемлемого решения и выбрать лучшее из них. Однако необходимо тщательно подготовиться и настроиться перед использование ТРИЗ, так как пессимистический настрой экспертов при получении качественных результатов, диктат авторитетных мнений, отсут-

ствие компетентной базы данных сводит весь творческий процесс к методу проб и ошибок, который обычно при цейтноте времени обсуждения приводит к коллизии (отсутствию качественного решения).

Выводы

Предложенный алгоритм выбора оптимальной электронной схемы по заданным техническим характеристикам позволяет:

1. Уменьшить объем исходной информации.
2. Сократить время проектирования.
3. Снизить влияние субъективных факторов на результат выбора.
4. Регулировать глубину поиска оптимальных решений.

Данный алгоритм применяется в дипломном проектировании кафедры «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» на этапе разработки технического предложения. Многолетний опыт использования разработанной методики показал эффективность применения данного алгоритма минимум на 30 % по сравнению с традиционными методами. Также сами полученные решения обладают уникальностью, оригинальностью и обычно рекомендуются к серийному внедрению на производстве.

Список литературы

1. *Уразаев, В. Г.* ТРИЗ в электронике. – М. : Техносфера, 2006. – 319 с.
2. *Альтшуллер, Г. С.* Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. – М .: Альпина Паблишер, 2015. – 402 с.
3. *Фролов, В. А.* Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. – М. : Высш. шк., 2010. – 310 с.
4. *Курганов, С. А.* Схемно-алгебраический анализ, диакоптика и диагностика линейных электрических цепей / С. А. Курганов, В. В. Филаретов. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 320 с.

P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
O. Ya. Shamsiakhmetov, leading electronic engineer
E-mail: kra_dept@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Use of TRIZ Techniques in Structural Synthesis and Optimization of Electronic Circuits

An ideal structural scheme is practically unrealizable, but with a sufficient degree of approximation, compromise options are possible. The problems of structural synthesis can be solved in three ways, using a given output characteristic. To optimize the schemes, a

method was suggested that activates creative abilities - TRIZ. An algorithm for choosing the optimal variant of the structural scheme was developed, and criteria for the consistency of the evaluation of expert groups and the uniformity of expert opinions were determined.

Keywords: structural synthesis, TRIZ, electronic scheme, evaluation criteria, heuristic algorithms.

УДК 621.3.084.2

И. А. Хайрутдинов, магистрант
E-mail: ilmirkhairutdinov@mail.ru
П. А. Ушаков, д-р техн. наук, профессор
E-mail: ushpet@izh.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Применение энергособирателей для увеличения времени работы систем дистанционного контроля

Энергособиратели представляют большой интерес для питания беспроводных систем, компонентов, т. к. могут обеспечить длительную и безотказную работу устройств без вмешательства человека. Также энергособиратели имеют ряд преимуществ в отношении характеристик надежности и цены. Данные устройства широко применяются в беспроводных системах, замещая аккумуляторы или поддерживая их заряд. Автономное питание на всех уровнях системной интеграции – перспективное направление в развитии беспроводных систем.

Ключевые слова: энергособиратели, дистанционный контроль, датчики, беспроводные системы, энергия, преобразователь.

Введение

В любом устройстве важными критериями являются качество и надежность. Если же оборудование выходит из строя довольно часто, то стоит задуматься о системе контроля за неисправностями. В большинстве случаев ходить и проверять оборудование лично бывает не рационально и накладно из-за его географического расположения. В таком случае целесообразно иметь систему дистанционного контроля.

© Хайрутдинов И. А., Ушаков П. А., 2018

Что такое дистанционный контроль? Дистанционный контроль – способ обнаружения неисправностей охраняемого участка, объекта, акватории с помощью систем и приборов. Дистанционный контроль проводится также в целях диагностики работоспособности систем и приборов.

Одной из важнейших проблем в системах дистанционного контроля является подача питания на удаленные датчики в районе наблюдаемого участка, акватории и других контролируемых объектов.

Целью данной статьи служит обзор типов энергособирателей для выбора принципа сбора энергии в дальнейших разработках беспроводных устройств.

Сведения из теории

Энергосбережение имеет актуальность в условиях растущего недостатка электроэнергии для питания большого количества электронных систем. Например, к ним относится мониторинг зданий, сооружений, летательных аппаратов, кораблей и т. д. В условиях, где невозможно вмешательство человека или допускается только однократная установка компонента и беспроводная работа устройства, а также для надежности и удобства эксплуатации батареи в жестких условиях, где не допускается обрыв проводов, единственный выход – энергособиратели.

Энергособиратели необходимы для преобразования механической, электромагнитной, тепловой, оптической и других видов энергии в электрическую. Источником энергии могут служить любые естественные природные явления, а также источники, созданные в результате человеческой деятельности.

В настоящее время сфера применения энергособирателей определяется наличием «свободной энергии» в окружающем пространстве конкретного прибора, в котором планируется использование энергособирателей, а также эффективностью существующих преобразователей, уровнем энергопотребления устройства.

Для сбора энергии в устройствах могут использоваться разнообразные технологии, например, для использования энергии вибрации – пьезоэлектрические преобразователи, тепловой энергии – термоэлектрические, солнечной энергии – фотоэлектрические.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что энергособиратели – устройства, преобразующие различные виды энергии в напряжение или ток для питания или зарядки аккумуляторов в устройствах.

Структура беспроводного датчика с применением энергособирателя может выглядеть следующим образом (рис. 1).

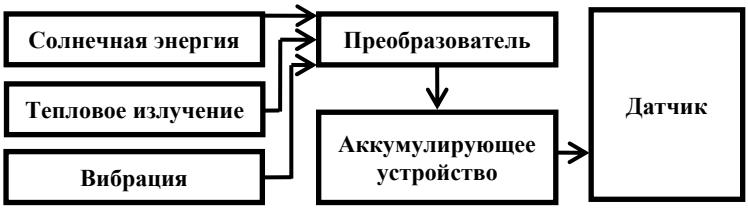
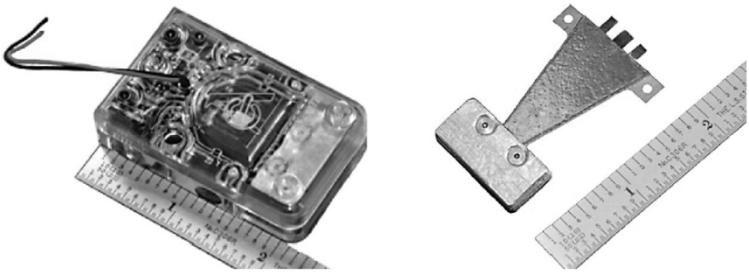


Рис. 1. Типовая структура датчика с применением энергособирателя

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим вибрационные энергособиратели на примере разработки Joule-Thief компании AdaptivEnergy, в которой используется технология упрочненных ламинированных пьезоэлектриков RLP (Ruggedized Laminated Piezo) (рис. 2, *а*). Пьезоэлектрический преобразователь преобразует механическую энергию вибрации в соответствующую электрическую энергию, что достигается при помощи пьезоэлектрической RLP-балки (рис. 2, *б*), прикрепленной к вибрационной структуре.



а *б*

Рис. 2. Технологии захвата вибрационной энергии AdaptivEnergy:
а – энергособирающий модуль Joule-Thief; *б* – энергособирающая RLP-балка

Полученное полезное напряжение далее преобразуется в полезное постоянное напряжение с использованием силового процессорного модуля. Модуль запаса мощности хранит сгенерированную мощность в батарее или конденсаторе.

В составе преобразователя Joule-Thief имеется композитная балка, которая состоит из кантилеверного клина с прикрепленным пьезоэлектрическим слоем и подвешенной на его наконечнике массой. RLP-балка работает в жестких условиях в течение длительного периода времени, что является плюсом данной технологии.

Один из вариантов реализации заключается в том, что обмотка на колеблющейся массе преобразует магнитное поле фиксированного магнита. Второй – в перемещении постоянной магнитной структуры относительно жестко удерживающейся обмотки.

Вибрационные энергособиратели интересны для питания датчиков вибрации, а также для датчиков, использующихся в вибрационной среде. Если же вибраций мало или они отсутствуют, возможно использование других источников энергии: свет, тепло, радиочастотная энергия. Также возможно использование одновременно нескольких источников энергии, что делает систему более универсальной.

Выводы

Таким образом, на основе всего вышесказанного можно сделать заключение, что использование рассмотренных в статье типов энергособирателей является перспективным способом рекуперации энергии.

Список литературы

1. *Шостаковский, П.* Термоэлектрические источники альтернативного электропитания // Компоненты и технологии. – 2012. – Т. 12, № 113. – 138 с.

2. Snyder, G. J. Complex thermoelectric materials / G. J. Snyder, E. S. Toberer // Nature materials. – 2014. – Vol. 7, № 2. – 114 p.

3. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций : учеб. пособие / А. И. Хальясмаа, С. А. Дмитриев, С. Е. Кокин, Д. А. Глушков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 64 с.

I. A. Khairutdinov, magister student
E-mail: ilmirkhairutdinov@mail.ru
P. A. Ushakov, DSc in engineering, professor
E-mail: ushpet@izh.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Use of Energy Harvesters to Increase the Working Time of Remote Control Systems

Energy harvesters are of considerable interest for powering wireless systems, components, since they can provide a significantly long and trouble-free operation of devices without human intervention. Also, energy harvesters have a number of advantages in terms of performance, reliability and price. These devices are widely used in wireless systems, replacing batteries or maintaining their charge. Autonomous power at all levels of system integration is a promising direction in the development of wireless systems.

Keywords: energy harvesters, remote control, sensors, wireless systems, energy, converter.

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

УДК 629.01

Е. Н. Балобанов, канд. техн. наук, инженер-конструктор
E-mail: balobanov@irz.ru
ООО «Ижевский радиозавод»
Г. В. Брагин, аспирант
М. А. Подсизерцева, магистрант
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Подход к проектированию контрольно-проверочной аппаратуры на базе приборов National Instruments для техники специального назначения

Предложен подход к разработке контрольно-проверочной аппаратуры для техники специального назначения с помощью приборов National Instruments и графической среды программирования LabVIEW, а также показана возможность создания масштабируемого программного обеспечения оборудования, изготовленного на базе стандарта PXI.

Ключевые слова: National Instruments, LabVIEW, контрольно-проверочная аппаратура

Введение

При разработке техники специального назначения на каждом этапе требуется тестирование и контроль параметров изделий. При этом возникает необходимость применения множества различных приборов, а также автоматизации процесса измерения. Широко распространено построение контрольно-проверочной аппаратуры на базе модульных приборов стандартов VXI и PXI [1]. Несмотря на то, что

© Балобанов Е. Н., Брагин Г. В., Подсизерцева М. А., 2018

стандарт VXI более давний представитель на рынке, имеет широкий номенклатурный набор модулей и более низкую стоимость, стандарт PXI имеет значительные преимущества, такие как собственная среда разработки LabView, высокая передаточная способность шины, возможность автоматизированного тестирования и небольшие размеры.

С целью снижения временных и трудовых затрат актуальной является разработка контрольно-проверочной аппаратуры на базе приборов National Instruments и технологии LabVIEW, позволяющих создать масштабируемую программную платформу. Масштабируемость [2] изготовленного оборудования PXI обеспечивает необходимый функционал контрольно-проверочной аппаратуры различного назначения с минимальным изменением приборного и программного обеспечения.

Реализация предложенного подхода на примере автоматизированных стендов проверки

Данная концепция была реализована при разработке автоматизированных стендов проверки (АСП) для контроля функционирования приборов из состава бортового комплекса управления малым космическим аппаратом.

В соответствии с требованиями был выделен необходимый функционал автоматизированного стенда проверки:

1. Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). Используются для регистрации массивов, а также для измерения падения напряжения на шунтах при косвенном измерении тока. Точность измерения обеспечивается точностью АЦП и прецизионными шунтами. Максимальная относительная погрешность измерения может быть достигнута 0,1 % от максимального значения измеряемой величины. Диапазон измерения токов от 5 А до 25 А.

2. Цифро-аналоговые преобразователи. Используются для имитации датчиков и управления электронной нагрузкой.

3. Имитация источника питания бортовой сети и имитация нагрузки. В качестве имитатора бортовой сети используются различные многоканальные источники питания (суммарная мощность порядка 4 кВт). В качестве имитаторов нагрузки используются электронные нагрузки.

4. Имитация цифровых интерфейсов и датчиков, а также выдача и прием сигналов синхронизации. Для решения данных задач используются модульные приборы стандарта PXI с программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС).

5. Контроль формы сигналов и их временных характеристик. Задача решается путем использования осциллографов фирмы National Instru-

ments, монтируемых в стойку PXI. В свою очередь для измерения падения напряжения на каналах питания используются мультиметры с абсолютной погрешностью измерения порядка нескольких микровольт.

Структурная схема АСП представлена на рис. 1.

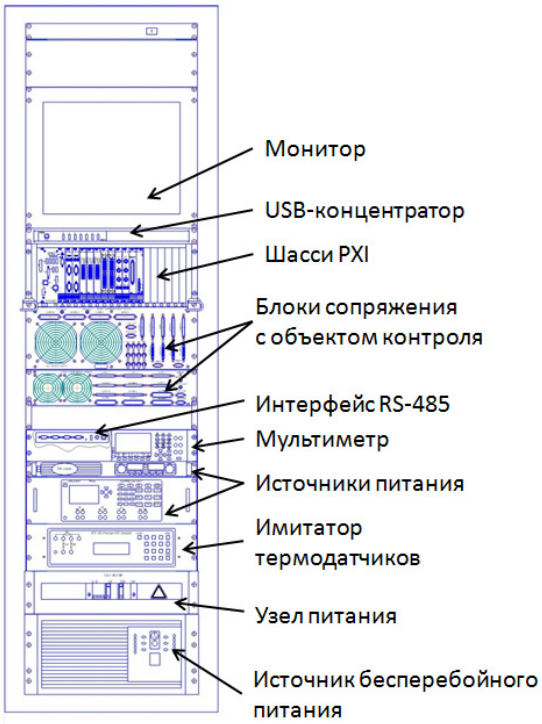


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного стенда проверки

Кроме модульных приборов в состав стенда входит покупная внешняя аппаратура, такая как: источники питания TDK Lamda, Rohde Shwart, HMP 2030, мультиметр KeySight, магазин сопротивлений RTD-500, источник бесперебойного питания на 5 кВт, сенсорный монитор, а также блоки сопряжения, разрабатываемые ООО «ИРЗ». Все оборудование имеет поддержку драйверов LabVIEW и может быть использовано в составе стойки в процессе автоматизации проверок [3]. Кроме того, в стенд входит автоматизированное рабочее место оператора, позволяющее осуществлять удаленное управление процессом выполнения проверок.

Программное обеспечение автоматизированных стендов проверок

В результате анализа алгоритмов контроля оказалось, что большинство проверок можно выполнить одними и теми же программными средствами, лишь изменяя их параметры. Таким образом, можно сократить количество реализаций компонентов программного обеспечения (ПО), используя одинаковые компоненты.

Для реализации заданного функционала была предложена архитектура ПО, показанная на рис. 2.

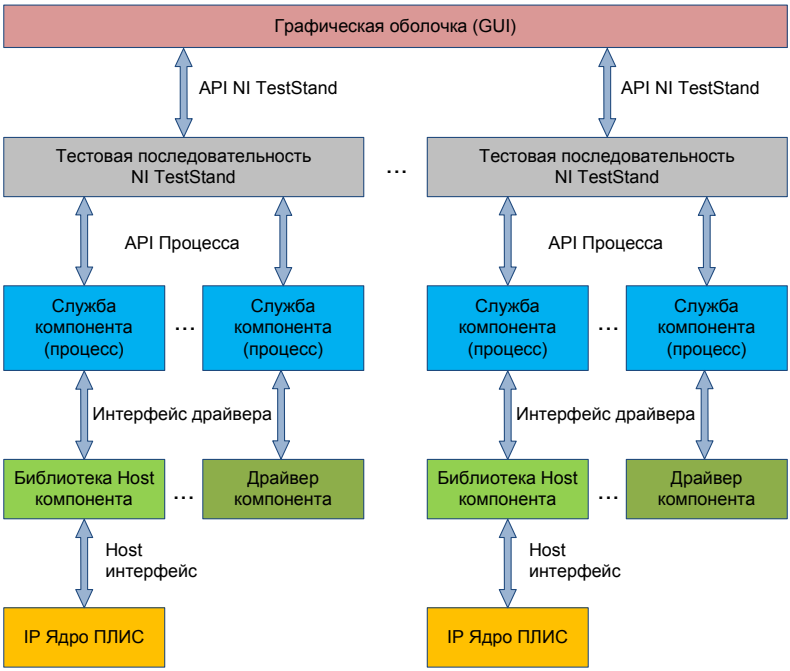


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения автоматизированного стенда проверок

Нижний уровень иерархии представляют собой IP ядра ПЛИС. Они реализуют набор логики, который инкапсулирует в себе внутреннее состояние.

Службы компонентов программного обеспечения выполняются в виде фонового процесса, управляемого извне посредством сообщений. Для передачи сообщений между процессами и API используется библиотека

АМС в составе пакета LabVIEW. Суть ее работы сводится к присваиванию уникального имени к каждому запущенному экземпляру процесса и отправке и приемке сообщений между ними посредством очередей. Таким образом, инкапсулируется функционал процесса от функций API.

За уровнем служб следует уровень тестовых последовательностей в среде NI TestStand [3]. NI TestStand представляет собой структурированную последовательность испытаний, содержащих вызов модулей LabVIEW либо модулей других систем, со сложной логикой принятия решений для управления общим ходом испытаний. Кроме того, данная среда имеет средства синхронизации различных потоков, что позволяет распараллеливать задачи при проверке приборов. NI TestStand поддерживает запись результатов в различные базы данных.

Графическая оболочка предназначена для реализации простого и удобного пользовательского интерфейса, использующего API TestStand. Это полезно в случаях, когда пользовательский интерфейс самого NI TestStand не решает всех поставленных задач (например, локализация на русский язык). При его разработке поддерживается как технология LabVIEW, так и другие языки программирования, например C++ и C#. API NI TestStand позволяет реализовать как простейшую оболочку, так и аналог самой среды NI TestStand.

Заключение

Таким образом, подход к проектированию контрольно-проверочной аппаратуры с использованием приборов фирмы National Instruments и технологии LabVIEW, позволяющих создать масштабируемое программное обеспечение, дает возможность свести разработку к следующим этапам:

- анализ технического задания;
- выбор и заказ оборудования PXI;
- выбор разработанных стандартных технических решений, позволяющих обеспечить требования ТЗ;
- изготовление;
- испытание на соответствие требованиям ТЗ;
- поставка потребителю.

Список литературы

1. *Афанасьев, В. Н.* Выбор платформы при построении модульных контрольно-измерительных систем / В. Н. Афанасьев, Е. В. Газов // Телекомму-

никации и транспорт. Спецвыпуск «Технологии информационного общества». Ч. 2. – 2009. – С. 88–89.

2. *Луковников, А. Н.* Разработка масштабируемой контрольно-проверочной аппаратуры для телеметрической системы космического аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – № 11, ч. 2. – С. 122–130.

3. Контрольно-проверочная аппаратура ИРЗ [Электронный ресурс] // Ижевский радиозавод. – URL: https://www.irz.ru/uploads/catalogs/catalog_kpa.pdf (дата обращения: 24.11.2017).

E. N. Balobanov, CSc in engineering, design engineer
E-mail: balobanov@irz.ru
LLC «Izhevskiy radiozavod»
G. V. Bragin, postgraduate student
M. A. Podsizertseva, magister student
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Approach to the Design of the Control-Verification Equipment at National Instruments Base for Special Purpose Equipment

The approach to the design of the control-verification equipment for special purpose equipment with help of hard-ware National Instruments and graphical programming environment LabVIEW and the possibility of creating scalable software for equipment based on the PXI standard.

Keywords: National Instruments, LabVIEW, control-verification equipment.

УДК 534.641

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.
В. В. Волков, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование акустических свойств биологических сред

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

© Богдан О. П., Волков В. В., 2018

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

Исследование акустических свойств различных сред позволяет оценивать их качество, что очень важно во многих областях промышленности [1–4] и медицины. В настоящее время известен целый ряд физических методов, с помощью которых можно получать информацию об акустических свойствах сред, в том числе и биологических [5]. Несмотря на это разработка новых и усовершенствование уже известных методов является важной и актуальной задачей. В частности, в области медицины не все известные методы исследования акустических свойств можно применять по причине того, что биологические ткани организма, например мягкие ткани, кровь или образцы внутренних органов, как правило, могут быть использованы в небольшом объеме. Кроме этого, точность измерений скорости и поглощения ультразвука, плотности, акустического импеданса должна быть высокой для достоверности получения конечных результатов.

Методика измерения акустического импеданса

Одним из методов, позволяющих оценивать акустический импеданс, является анализ амплитудно-частотных и электрических характеристик пьезопластины, нагруженной на исследуемую среду, эталонную среду (для калибровки по амплитуде колебаний излучения) и воздух (для учета внутренних потерь в пьезопластине) [6, 7]. В основе метода лежит представление колеблющейся пьезопластины эквивалентной электрической схемой, состоящей из чисто электрической емкости C_1, соединенной параллельно с цепочкой последовательно соединенных индуктивности L, емкости C и активного сопротивления $R = R_V + R_I$, рассмотренной в [5–7], и использование электроакустических аналогий путем преобразования всех элементов механической системы в электрические.

Электрическая схема измерительной установки, реализующей данный метод, представлена на рис. 1. С генератора G через сопротивление развязки R_p подается напряжение на пьезопластину ПП, нагруженную на исследуемую, эталонную среды или воздух, при этом измеряется с использованием осциллографа ее амплитудно-частотная характеристика, из которой определяются значения частоты резонанса f_r, антирезонанса f_a и соответствующие им напряжения U_r,U_a.

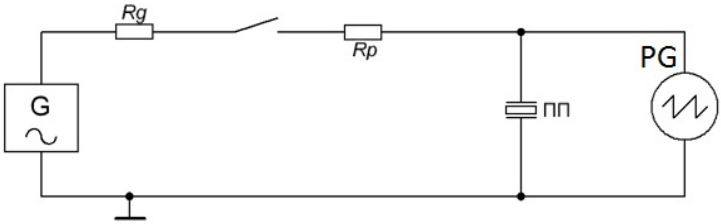


Рис. 1. Электрическая схема измерительной установки:
R_p – сопротивление развязки, *PG* – осциллограф, *G* – генератор,
ПП – пьезопластина, R_g – сопротивление генератора

Акустический импеданс Z определяется по формуле

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{R0_I}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \tag{1}$$

где U_C и U_{C0} – напряжение на конденсаторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду соответственно,

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

U_{RI} и U_{R0I} – напряжение на резисторе $R_I = R - R_V$ и $R_{I0} = R_0 - R_V$,

$$U_{R_I} = \frac{U_r R_I}{R_V + R_I}; \tag{3}$$

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

Для минимизации погрешности измерения акустического импеданса рекомендуется проводить измерения в одних и тех же условиях, с помощью одной и той же пьезопластины правильной формы с равными сторонами, использовать сопротивление развязки R_p = 100–300 Ом, напряжение генератора не менее 10 В.

Результаты и обсуждение

Проведены измерения акустического продольного в биологических средах (мышечные волокна, печень, молоко различной жирности) с использованием продольной пьезопластины ЦТС-19 размером 20×20×1 мм,

емкость C_1 = 4,4 нФ, напряжение генератора U_g = 10 В, сопротивление развязки 300 Ом, эталонная среда – вода ($Z_0 = 1{,}5 \cdot 10^6$ Па·с/м).

Результаты измерения значений частот резонанса f_r, антирезонанса f_a, соответствующих им напряжений U_r ,U_a и электрических параметров эквивалентной схемы замещения пьезопластины в воздухе и воде представлены в табл. 1. Данные параметры используются для расчета акустических импедансов исследуемых сред по формулам (1)–(3).

Таблица 1 **Электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на воздух и воду**

Среда	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	R, Ом	C, нФ	L, мкГн
Воздух	2,01	2,22	0,076	5,75	2,68	0,97	6,48
Вода	1,98	2,22	0,27	2,0	7,32	1,13	5,71

Результаты измерения амплитудно-частотной характеристики для продольной пьезопластины, нагруженной на молоко различной жирности, печень свиную и мышечные волокна при различной температуре, представлены на рис. 2–4.

Из рис. 2 видно, что с увеличением жирности молока с 1,5 до 10 % наблюдается увеличение напряжения U_a, при этом U_r практически не меняется; изменение жирности молока приводит к изменению параметров электрической схемы замещения пьезопластины, нагруженной на молоко (табл. 2).

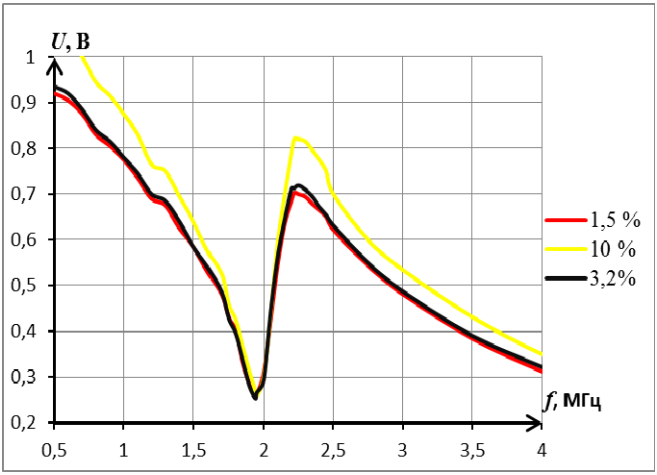


Рис. 2 Амплитудно-частотная характеристика продольной пьезопластины, нагруженной на молоко различной жирности

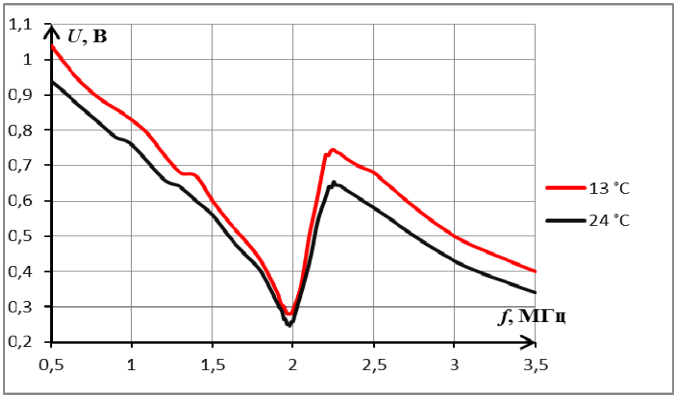


Рис. 3 Амплитудно-частотная характеристика продольной пьезопластины, нагруженной на мышечные волокна различной температуры

Аналогичные исследования выполнены для продольной пьезопластины, нагруженной на печень свиную (рис. 4) и мышечные волокна (рис. 3) при различной их температуре (13˚, 24˚). Из полученных результатов видно, что с увеличением температуры наблюдается уменьшение напряжения U_a, U_r во всех средах, при этом f_r возрастает, что приводит к изменению параметров электрической схемы замещения продольной пьезопластины, нагруженной на эти среды (табл. 2). Увеличение температуры исследуемой среды ведет к уменьшению активного сопротивления R и емкости C и, наоборот, приводит к увеличению индуктивности L.

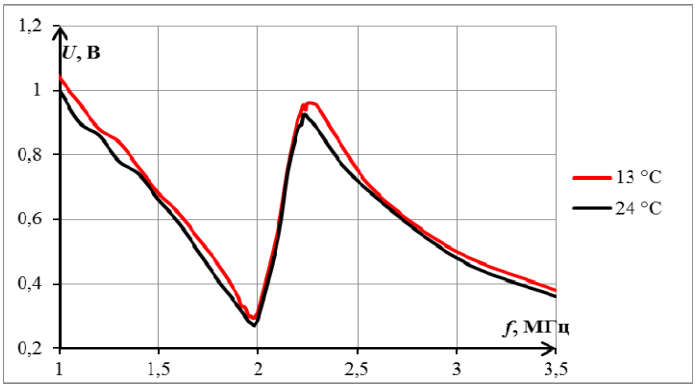


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика продольной пьезопластины, нагруженной на печень свиную различной температуры

Таблица 2. **Параметры Электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на биологические среды**

Изменяемый параметр	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	U_a, В	R, Ом	C, нФ	L, мкГн
Температура	Печень свиная						
13 °С	1,97	2,25	0,30	0,96	8,14	1,34	4,87
24 °С	1,98	2,24	0,27	0,93	7,03	1,23	5,25
Температура	Мышечные волокна						
13 °С	1,97	2,25	0,28	0,75	7,40	1,34	4,87
24 °С	1,98	2,25	0,25	0,66	6,29	1,28	5,04
Жирность	Молоко						
1,5 %	1,94	2,22	0,26	0,7	5,91	1,46	4,63
3,2 %	1,94	2,22	0,25	0,71	5,77	1,46	4,63
10 %	1,95	2,22	0,26	0,82	5,99	1,39	4,79

Основываясь на полученных данных и с помощью формул (1)–(3) определено значение продольного акустического импеданса для молока различной жирности, печени свиной и мышечных волокон при различной температуре (табл. 3).

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

$$Z = \rho C_1, \tag{4}$$

где ρ – плотность среды; C_l – скорость продольной ультразвуковой волны в среде, то данное явление объясняется изменением плотности молока при изменении количества молочного жира, содержащегося в нем. Плотность молочного жира (ρ = 924 кг/м^3) [8] меньше плотности обезжиренного молока (ρ = 1030 кг/м^3) [8], следовательно, с увеличением жирности плотность молока уменьшается, что ведет к уменьшению акустического импеданса.

Увеличение температуры печени свиной и мышечных волокон приводит к уменьшению их продольного акустического импеданса (табл. 3), т. к. увеличение температуры ведет к тепловому расширению вещества, вследствие чего уменьшается его плотность. В табл. 3 также приведены справочные значения акустического импеданса печени свиной и мышечных волокон при температуре 37º, что подтверждает правильность измерений.

Таблица 3. **Акустический продольный импеданс биологических сред**

Изменяемый параметр	Акустический импеданс Z, 10^6 Па·с/м
Температура	Печень свиная
13 °С	2,34
24 °С	1,77
37° (справочное)	1,65
Температура	Мышечные волокна
13 °С	2,22
24 °С	1,73
37° (справочное)	1,63
Жирность	Молоко
1,5 %	1,31
3,2 %	1,29
10 %	1,21

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

Список литературы

1. *Муравьева, О. В.* Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, Ю. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 3–10.

2. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

3. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. Сер. «Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures». – 2015. – С. 020156.

4. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

5. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике: пер. с нем. / под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. – М. : Изд-во ин. лит., 1957. – 726 с.

6. Исследование амплитудно-частотных и электрических характеристик пьезопластины нагруженной на различные среды / Д. В. Злобин, О. П. Богдан, А. А. Климова, В. В. Волков // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке [Электронный ресурс] : электрон. науч. изд. : сб. материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием, Ижевск, 20–21 апр. 2016 г. / ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». – Электрон. дан. (1 файл : 33 Mb.). – Ижевск : ИННОВА, 2016. – 1044 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 344–349.

7. *Богдан, О. П.* Исследование влияния параметров измерительной установки на амплитудно-частотные и электрические характеристики пьезопластины, нагруженной на различные среды / О. П. Богдан, А. А. Климова, В. В. Волков // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова 2017. – С. 163–169.

8. ГОСТ 31450–2013 Молоко питьевое. Технические условия. – Введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014.

O. P. Bogdan, CSc in engineering, associate professor
V. V. Volkov, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Study of the Acoustic Properties of Biological Media

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

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

УДК 534-8

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.
В. В. Волков, магистрант
О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф., глав. науч. сотр. УНИР
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Моделирование упругих деформаций продольной пьезопластины в программной среде Comsol

В работе представлены основные подходы к моделированию пьезоэлектрических устройств, в частности продольной пьезопластины в программной среде COMSOL Multiphysics. Показано влияние толщины и материала пьезопластины на ее амплитудно-частотную характеристику.

Ключевые слова: упругая деформация, продольная пьезопластина, Comsol Multiphysics, численное моделирование, метод конечных элементов.

Введение

Ультразвуковой контроль материалов и изделий невозможно реализовать без датчиков, самыми широко используемыми являются пьезопреобразователи в основе которых лежат прямой и обратный пьезоэффект [1–8]. Основным элементом пьезопреобразователей является пьезопластина, изготавливаемая из пьезоматериала и поляризованная в одном из направлений, определяющее направление деформации пьезопластины в процессе пьезоэффекта. Чаще всего используют пьезопластины поляризованные по толщине, обеспечивающие деформацию в этом же направлении, называемую продольной.

Перед проектированием и изготовлением преобразователей необходимо промоделировать его работу и выполнить расчет всех его параметров для определения наиболее оптимальнымх для обеспечения эффективности работы [1–8]. Моделирование в различных программных средах в настоящее время привлекает огромное внимание и получило необычайно широкое применение во многих областях науки и промышленности: от медицины до ядерной физики и других разделов.

© Богдан О. П., Волков В. В., Муравьева О. В., 2018

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

При моделировании работы пьезопластины, в том числе и ее упругих деформаций, возникают различные сложности, например, с определением граничных условий. Наиболее эффективным при исследовании деформаций пьзопластины в процессе ее работы является численное моделирование в программной среде Comsol Multiphysics, использующей метод конечных элементов, позволяющая проводить анализ в частотной области, анализ на собственные частоты, преднапряженный анализ, анализ во временной области и т.п.

Модель пьезопластины в программной среде Comsol Multiphysics

Модель пьезопластины представляет собой круглую поверхность с задаваемыми размерами, помещенная в воздушную среду (рис. 1). В методе конечных элементов необходимо выполнить дискретизацию области, включающую построение конечно-элементной сетки (рис. 2), задание свойств (материала) элементов (табл. 1, табл. 2). В процессе моделирования учитываются все резонансы и шумы, возникающие в пьезопластине, поэтому для исключения различного вида ошибок и посторонних резонансов необходимо воспользоваться условием, учитывающим распределение упругих колебаний в бесконечность.

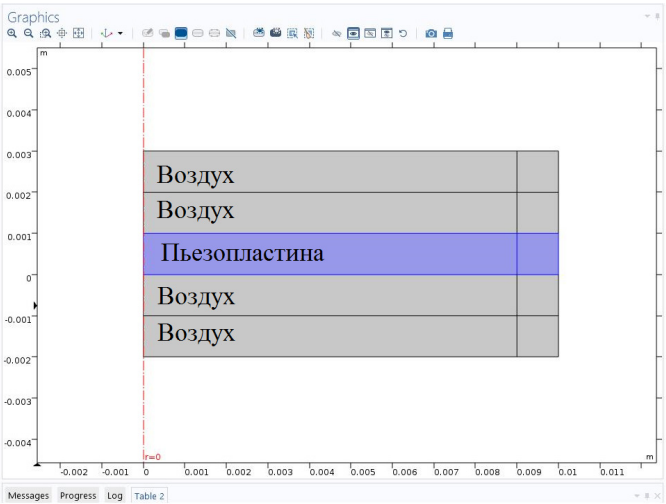


Рис. 1. Модель пьезопластины в воздухе

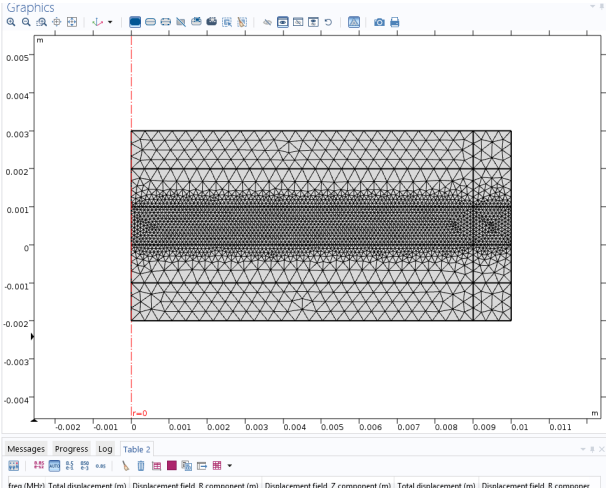


Рис. 2. Модель пьезоэлемента с конечно-элементной сеткой

В табл. 1 и 2 представлены свойства используемых пьезоэлектрических материалов и окружающей ее среды – воздуха.

Таблица 2. **Свойства пьезоматериала**

Материал	Плотность ρ, кг/м^3	Пьезомодуль d_{33}, Кл/Н
PZT-5H	7500	$5{,}93\cdot10^{-10}$
PZT-4	7500	$2{,}89\cdot10^{-10}$
PZT-5A	7750	$3{,}74\cdot10^{-10}$
PZT-4D	7600	$3{,}15\cdot10^{-10}$
PZT-2	7600	$1{,}52\cdot10^{-10}$

Таблица 2. **Свойства воздуха**

	Параметр	Численное значение	Единица измерения
Воздух	Модуль Юнга, E	142000	Па
	Коэффициент Пуассона, η	0,4999	–
	Диэлектрическая проницаемость	1,00058	–

Для устранения влияния различных паразитных деформаций пьезопластины матрица ее пьезосвойств задается только пьезомодулем d_{33}, что соответствует поляризации пьезопластины по толщине, приравнивая нулю все остальные компоненты (рис. 3).

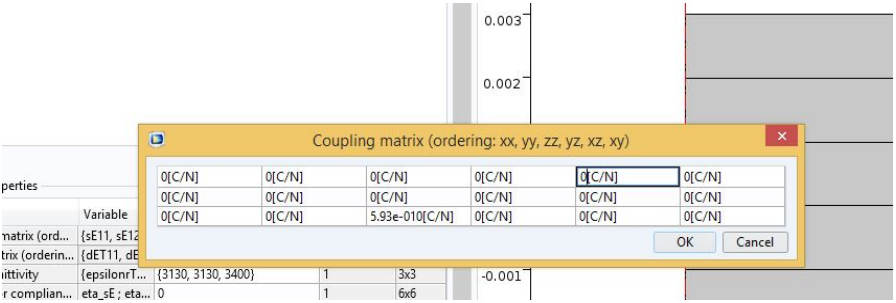


Рис. 3. Матрица пьезомодулей пьезопластины

Результаты и обсуждения

Для решения построенной модели в программной среде необходимо задать исходные параметры, среди которых толщина пьезопластины, диапазон частот, материал пьезопластины, подаваемое напряжение и механическое сопротивление, учитывающее потери (табл. 3).

Таблица 3. **Задаваемые параметры**

Параметр	Численное значение
Толщина пьезопластины h, мм	0,5;0,8;0,9;1;1,2
Диапазон частот f, МГц	1–3
Напряжение U, В	10
Механическое сопротивление (Mechanical damping)	0,01
Шаг частоты	0,01

Решая с определенным шагом поставленную задачу, получаем результаты деформации и абсолютных смещений пьезопластины в заданном диапазоне частот. В качестве примера на рис. 4 представлена деформация пьезопластины PZT-5H толщиной h = 1 мм на частоте f = 2,05 МГц.

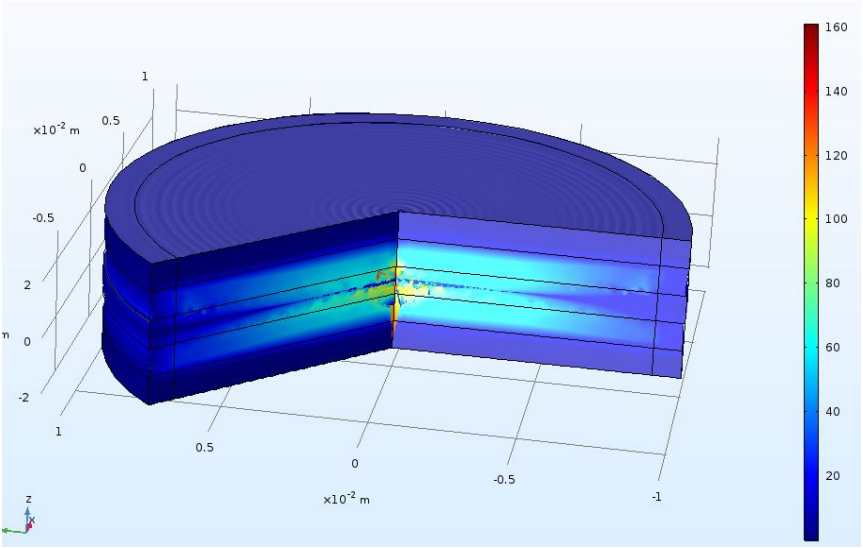


Рис. 4. Пример трехмерной модели деформации пьезопластины PZT-5H толщиной h = 1мм на частоте 2,05 МГц

На рис. 5 представлены зависимости абсолютных смещений пьезопластины от частоты f в диапазоне 1–3 МГц для различных пьезоэлектрических материалов толщиной h = 1 мм, находящихся в одинаковых условиях. Из графиков (рис. 5) видно, что амплитуда смещений пьезопластины увеличивается при увеличении пьезомодуля, например пьезопластина PZT-2 с пьезомодулем d_{33} = $1{,}52 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н имеет наименьшую амплитуду смещений (в области антирезонанса равна 0,21 нм), а пьезопластина PZT-5H с пьезомодулем d_{33} = $5{,}93 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н, наоборот, имеет максимальную амплитуду смещений (в области антирезонанса равна 0,63 нм).

На рис. 6 представлены полученные зависимости абсолютных смещений пьезопластины от частоты f в диапазоне 1–3 МГц для материала PZT-5H с различными толщинами пьезопластины (0,5 мм, 0,8 мм, 0,9 мм, 1,0 мм и 1,2 мм). Из графика на рис. 6 видно, что при увеличении толщины пьезопластины наблюдается уменьшение амплитуды смещения пьезопластины и сдвига частоты антирезонанса в сторону низких частот. Например, при толщине пьезопластины h = 0,5 мм антирезонанс наступает на частоте 2,59 МГц, амплитуда смещения при этом составляет 0,9 нм, а при толщине h =1 мм – 2,06 МГц и 0,61 нм.

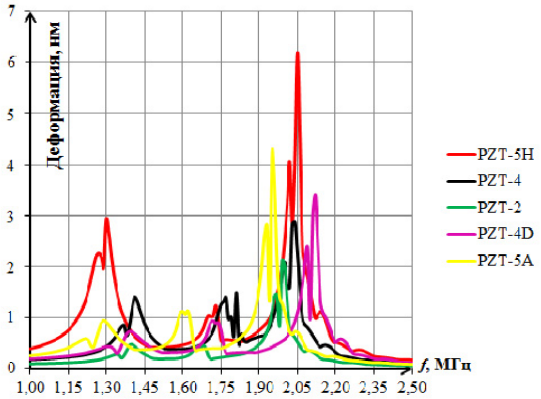


Рис. 5. Зависимость абсолютных смещений пьезопластины от частоты для различных пьезоматериалов

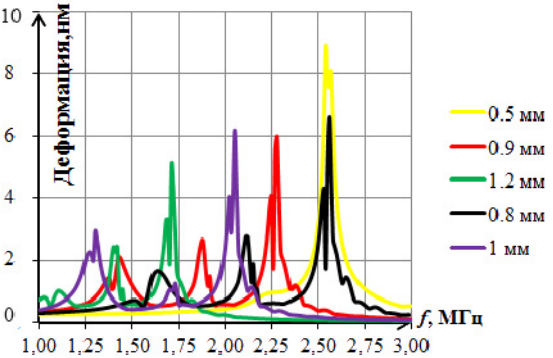


Рис. 6. Зависимость абсолютных смещений пьезопластины от частоты

Выводы

Таким образом, по результатам моделирования колебаний пьезопластины в программной среде Comsol Multiphysics можно сделать следующие выводы:

– при увеличении пьезомодуля d_{33} пьезопластины увеличивается ее деформация по амплитуде,

– при уменьшении толщины пьезопластины h наблюдается смещение резонанса в сторону больших частот, при этом увеличивается ее амплитуда смещения.

Все это необходимо учитывать при выборе пьезоматериала для проведения каких либо измерений или при разработке и изготовлении пьезопреобразователей.

Список литературы

1. Electromagnetic-acoustic sensor of the rod cross section ellipticity / O. Muravieva, V. V. Muraviev, K. V. Petrov, M. A. Gabbasova // International Siberian Conference on Control and Communications, (SIBCON-2015) : Proceedings. – 2015. – С. 7147155.

2. *Муравьева, О. В.* Влияние конструктивных особенностей противофазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. 2014. № 9. – С. 41–49.

3. *Муравьева, О. В.* Оценка влияния конструктивных особенностей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей на формирование диаграмм направленности / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2014. – № 1. – С. 47–54.

4. *Муравьева, О. В*. Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2013. – № 12. – С. 69–76.

5. *Буденков, Г. А*. К расчету пьезопреобразователей рэлеевских волн / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 1992. – № 10. – С. 13.

6. Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics / К. В. Петров, А. Ф. Башарова, Г. Л. Пушина, Е. В. Недзвецкая // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск, 2017. – С. 284–291.

7. *Muravieva, O. V.* Modeling interactions between the magnetic and eddy current fields of the electromagnetic-acoustic transducer / O. V. Muravieva, K. V. Petrov, Yu. V. Myshkin // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016) : Proceedings 2. – 2016. – P. 7911702.

8. *Petrov K.V., Muravieva O.V., Gabbasova M.A.* Mathematical modeling of the acoustic wave propagation generated by the through-type transducer in a cylindrical object / K. V. Petrov, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 803, no 1. – P. 012114.

O. P. Bogdan, CSc in engineering, associate professor
V. V. Volkov, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Simulation of Elastic Deformations of a Longitudinal Piezoceramic Plate in the Comsol Software Environment

The paper presents the main approaches to the modeling of piezoelectric devices, in particular longitudinal piezoceramic plates in the COMSOL Multiphysics software environment. The influence of the thickness and material of the piezoelectric plate on its amplitude-frequency response is shown.

Keywords: elastic deformation, longitudinal piezoceramic, Comsol Multiphysics, numerical simulation, finite element method.

УДК 615.47: 616-073

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.
Д. В. Злобин, канд. техн. наук, доц.
Н. А. Бабайлов, магистрант
Ю. С. Дудина, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Разработка формирователя пузырьков на основе пьезокерамики CH-s42 для устройства оценки интенсивности ультразвукового излучения

В работе представлены разработки формирователя пузырьков в жидкости на основе пьезокерамики CH-s42 и импульсного генератора для его возбуждения, используемые в устройстве оценки интенсивности ультразвукового излучения медицинской диагностической аппаратуры.

Ключевые слова: интенсивность ультразвукового излучения, равновесный газовый пузырек, диагностический сканер, пьезопластина, импульсный генератор, кавитация.

© Богдан О. П., Злобин Д. В., Бабайлов Н. А., Дудина Ю. С., 2018

Введение

Диагностические сканеры, используемые при ультразвуковом (УЗ) исследовании, нуждаются в периодической поверке их параметров [1], одним из которых является интенсивность УЗ-излучения, связанная с безопасностью проведения исследования (локальный перегрев ткани, денатурация белков, разрушение биологических тканей и т. п.) [1, 2].

Для оценки интенсивности УЗ-излучения разработано устройство, представленное в [3], в основе которого лежит измерение радиусов равновесных пузырьков в жидкости в поле датчика УЗ-сканера, равновесие которых достигается за счет равенства действующих на них выталкивающей силы и силы радиационного давления [2, 3]. Формирование пузырьков происходит посредством стабильной кавитации в жидкости, в результате излучения в нее УЗ-волны низкочастотным преобразователем, на который подается электрическое напряжение с генератора [2]. Точность и достоверность оценки интенсивности УЗ-излучения зависит от количества и диапазона размеров кавитационных пузырьков, создаваемых формирователем пузырьков в процессе измерения, и при их увеличении уменьшается ошибка измерения и увеличивается область применения устройства оценки интенсивности УЗ-излучения.

Поэтому возникает необходимость в разработке формирователя пузырьков, состоящего из низкочастотного преобразователя и генератора для его возбуждения, позволяющего формировать максимально возможное количество пузырьков в широком диапазоне их радиусов.

Разработка низкочастотного преобразователя на основе пьезокерамики CH-s42

Основным элементом низкочастотного преобразователя является пьезопластина из сегнетожесткой пьезокерамики CH-s42 диаметром 50 мм, толщиной 2,6 мм: рабочая частота 40±1 кГц, статическая емкость 8000 ± 10% пФ, импеданс резонанса ≤20 Ом, мощность 35 Вт, скорость звука 4000 м/с. Преимуществами пьезокерамики CH-s42 являются высокая эффективность преобразования, высокая механическая добротность, низкое тепловыделение, термическая стабильность, долговечность и стабильность работы.

Пьезопластина из сегнетожесткой пьезокерамики CH-s42 распаивается и устанавливается в корпус, который выполнен при помощи 3d-принтера из ABS-пластика. 3D-модель корпуса, разработанная для печати, приведена на рис. 1, *б*. Сборочный чертеж низкочастотного преобразователя представлен на рис. 1, *а*.

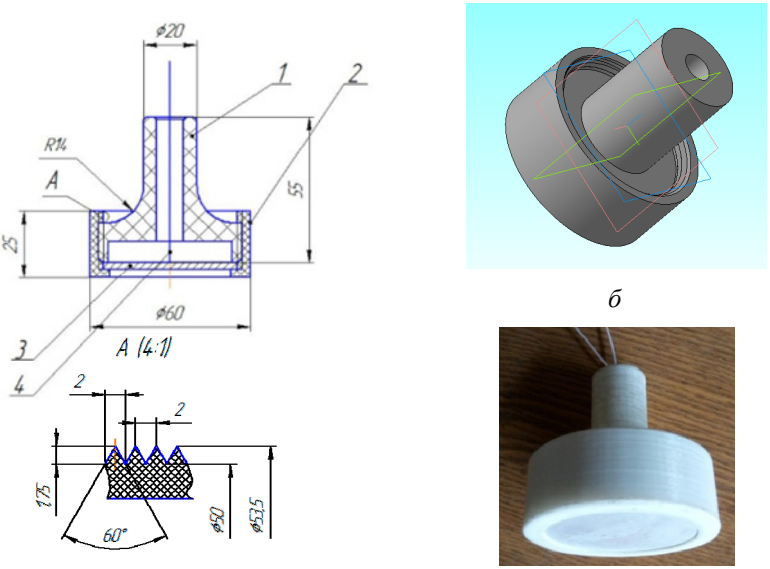


Рис. 1. Схема (*а*), 3D-модель корпуса (*б*) и внешний вид низкочастотного преобразователя (*в*): *1*, *2* – корпус из ABS-пластика; *3* – пьезопластина CH-s42; *4* – элекрические выводы

Амплитудно-частотные характеристики низкочастотного преобразователя, нагруженного на воздух и воду, представлены на рис. 2. На графике (рис. 2) наблюдается явление резонанса на частоте 45 кГц при нагружении преобразователя на воду, сопротивление преобразователя при этом 53 Ом, и 46 кГц в воздухе – 24 Ом.

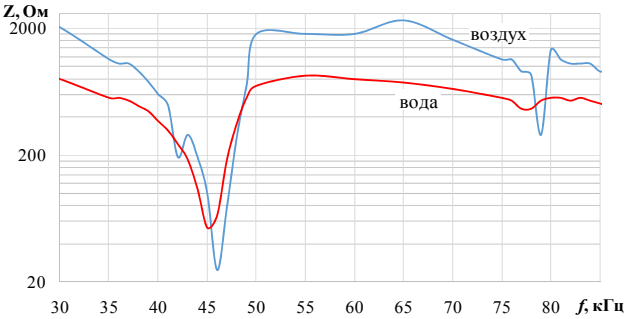


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика низкочастотного преобразователя на основе пьезокерамики CH-s42

Значение сопротивления преобразователя в области резонанса необходимо учитывать при разработке возбуждающего генератора для их согласования.

Угол раскрытия основного лепестка низкочастотного преобразователя на основе пьезокерамики CH-s42 составил 66°, что позволяет создавать кавитационные пузырьки в большой зоне обзора, ближняя зона составила 17 мм.

Разработка импульсного генератора для возбуждения низкочастотного преобразователя

Существуют различные варианты исполнения импульсных генераторов, например, однотактный преобразователь напряжения (низкий КПД), двухтактный преобразователь напряжения и мостовой преобразователь напряжения (сложность исполнения силовой части и управления), полумостовой преобразователь напряжения (появления сквозных токов в ключах в момент их переключения).

Наиболее оптимальным решением при проектировании генератора возбуждения низкочастотного преобразователя является полумостовая схема, которая лишена недостатков других схем. Принципиальная схема разработанного импульсного генератора представлена на рисунке (рис. 3), в основе которого лежит самотактируемый полумостовой драйвер IR2153.

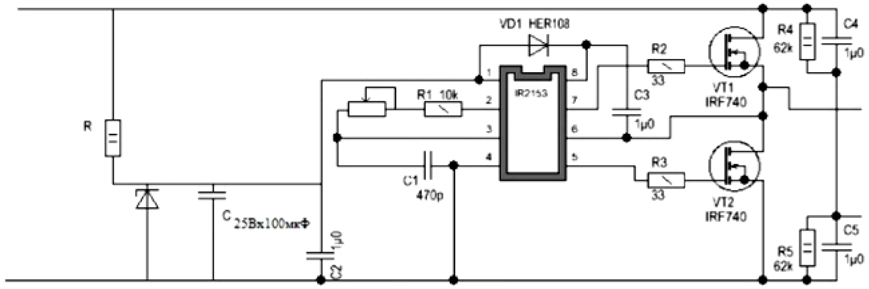


Рис. 3. Электрическая схема импульсного генератора

В момент подачи напряжения конденсатор C1 не заряжен и на инвертирующих входах операционных усилителей присутствует ноль. На неинвертирующих входах присутствует положительное напряжение, создаваемое резистивным делителем. В результате все три операционных усилителя на своих входах формируют логическую единицу – напряжение, близкое к напряжению питания. RS-триггер переходит в

состояние логической единицы, конденсатор C1 заряжается. При достижении значения напряжения в делителе около 10 вольт RS-триггер переключается в состояние нуля, и конденсатор разряжается, пока RS-триггер вновь не перейдет в логическую единицу и процесс не повторится. В момент включения силовой транзистор нижнего плеча VT2 открыт, происходит заряд конденсатора C3. В момент переключения RS-триггера управляющий сигнал закрывает транзистор VT2, открывая транзистор VT1. Для удержания этого транзистора в открытом состоянии используется конденсатор C3, заряженный до 15 вольт. Разряжаться на шину питания микросхемы конденсатору мешает диод VD1. После закрытия транзистора VT1 вновь открывается VT2, заряжающий конденсатор C3 до нужного состояния. Сигнал, формируемый на выходе импульсного генератора, представлен на рис. 4.

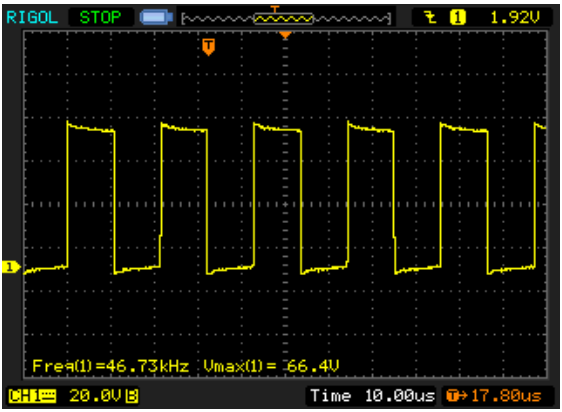


Рис. 4. Осциллограмма сигнала на выходе генератора

Характеристики разработанного импульсного генератора:
– принцип возбуждения: автогенераторный;
– форма сигнала: меандр;
– электрическое напряжение: 15–400 В;
– рабочая частота: 1–200 кГц.

Апробация разработанного формирователя пузырьков

Разработанный формирователь пузырьков был использован для формирования стабильных кавитационных пузырьков при оценке интенсивности УЗ-излучения диагностического сканера EDAN U50 с конвексным датчиком в B-режиме с частотой излучения 2,5 МГц, регистрация изо-

бражения производилась фотоаппаратом Nikon D800 с объективом Nikkor AF 200mm f/4 Micro. Изображение стабильных кавитационных пузырьков, полученных с использованием разработанного формирователя пузырьков, представлено на рис. 5. Из рис. 5 видно, что в результате излучения УЗ-волны низкочастотным преобразователем формируется достаточно большое количество кавитационных пузырьков, расположенных по всему полю преобразователя, которые имеют достаточно большой диапазон размеров, что хорошо видно на их увеличенном изображении. Интенсивность УЗ-излучения конвексного датчика сканера EDAN U50 составила 352 мВт/см^2 в зоне фокуса на глубине 20 см.

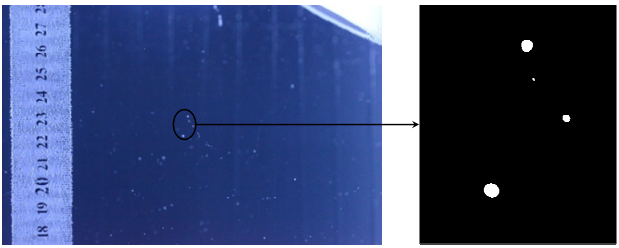


Рис. 5. Результаты апробации формирователя пузырьков

Выводы

Таким образом, разработан формирователь кавитационных пузырьков, состоящий из низкочастотного преобразователя на основе сегнетожесткой пьезокерамики CH-s42 и импульсного генератора, работающего в диапазоне частот 1–200 кГц с выходным напряжением 15–400 В, позволяющий получить большое количество стабильных кавитационных пузырьков в воде в широком диапазоне их радиусов, что дает возможность его использования для оценки интенсивности УЗ-излучения практически любого УЗ-оборудования.

Список литературы

1. 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.

2. Experimental evaluation of the ultrasound radiation intensity of medical equipment based on the analysis of the sizes of equilibrium gas bubbles in a liquid / O. V. Muravieva, O. P. Bogdan, D. V. Zlobin, V. N. Milich, S. I. Maslennikov, Yu. S. Dudina // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60, no. 1. – Pp. 137–142.

3. Устройство для определения параметров ультразвукового преобразователя : пат. 140996 Рос. Федерация / Муравьева О. В., Богдан О. П., Милич В.Н., Масленников С. И. – № 2014101525 ; заявл. 17.01.2014 ; опубл. 27.05.2014.

O. P. Bogdan, CSc in engineering, associate professor
D. V. Zlobin, CSc in engineering, associate professor
N. A. Babaylov, magister student
Yu. S. Dudina, postgraduate student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Development of the Generator of Bubbles on the Basis of CH-s42 Piezoelectric Ceramics for the Device of Assessment of Intensity of Ultrasonic Radiation

In operation are provided development of the generator of bubbles to the liquids on the basis of piezoelectric ceramics of CH-s42 and the pulse oscillator for its excitation used in the device of assessment of intensity of ultrasonic radiation of a medical diagnostic equipment.

Keywords: intensity of ultrasonic radiation, equilibrium gas bubble, diagnostic scanner, piezo plastic, pulse generator, cavitation.

УДК 534.641

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.
М. А. Подсизерцева, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование влияния температуры машинного масла на его акустический импеданс

В работе представлены результаты исследования влияния температуры машинного масла различных марок на его акустический продольный импеданс посредством анализа изменения амплитудно-частотных характеристик пьезопластины, нагруженной на эти среды, и ее электрических характеристик эквивалентной электрической схемы замещения.

© Богдан О. П., Подсизерцева М. А., 2018

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00051)

Ключевые слова: акустический импеданс, моторное масло, температура, пьезопластина, эквивалентная электрическая схема.

Введение

Оценка физических свойств материалов и веществ является одной из основных составляющих обеспечения надлежащего качества продукции [1–5], особенно смазочных масел, используемых при эксплуатации двигателей. В настоящее время на рынке представлено большое количество различных марок машинных масел, качество которых оценивают по таким физическим свойствам, как вязкость, температура вспышки, плотность и др. [ГОСТ 10541–78, ГОСТ Р 51634–2000], зависящим от температуры. Еще одним физическим параметром, по величине которого можно оценить качество масла, является акустический продольный импеданс.

В процессе эксплуатации двигателей окружающая температура может изменяться в больших пределах, поэтому является актуальным исследование изменения физических свойств машинных масел при варьировании его температуры.

Устройство измерения акустического импеданса

Блок-схема устройства измерения акустического импеданса машинного масла при различной температуре показана на рис. 1. Принцип измерения состоит в следующем: на продольную пьезопластину 5, нагруженную последовательно на воздух (для устранения внутренних потерь в пьезопластине), воду 3 (используемую в качестве эталонной среды для калибровки устройства) и исследуемую среду 4 через сопротивление развязки R_p 2 с генератора 1 подается сигнал с заданной амплитудой U_g. Изменяя частоту сигнала на генераторе 1, с помощью осциллографа 8 получают амплитудно-частотные характеристики пьезопластины, нагруженной на различные среды, из которых определяют минимальное U_r значение напряжения, снимаемого с пьезопластины, соответствующее ему значение резонансной частоты f_r и антирезонансную частоту f_a [6]. Температура среды в процессе измерения контролируется пирометром 7, к которому подключен датчик температуры 6, погруженный в исследуемую среду.

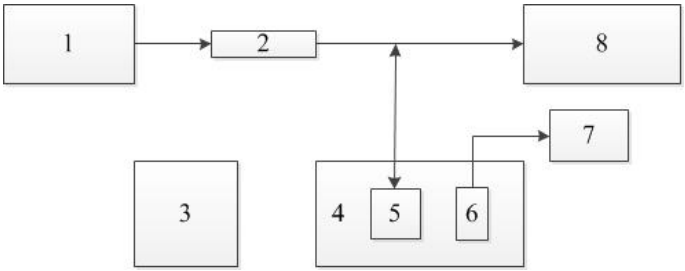


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустического импеданса: *1* – генератор, *2* – сопротивление развязки R_p, *3* – емкость с эталонной жидкостью, *4* – емкость с исследуемой жидкостью, 5 – пьезопластина, 6 – датчик температуры, 7 – пирометр, 8 – осциллограф

Представив пьезопластину в виде эквивалентной электрической схемы, по измеренным величинам можно определить ее эквивалентные параметры [5, 6]:

– эквивалентная емкость C

$$C = C_1\left[\left(\frac{f_a}{f_r}\right)^2 - 1\right], \tag{1}$$

– эквивалентная индуктивность L

$$L = \frac{1}{f_r^2 C 4\pi^2}, \tag{2}$$

– эквивалентное сопротивление R

$$R = \frac{R_p}{\frac{U_g}{U_r} - 1}, \tag{3}$$

где U_g – напряжение, подаваемое на пьезоэлемент; R_p.– сопротивление развязки; C_1 – геометрическая емкость пьезопластины.

Смоделировав работу эквивалентной схемы замещения пьезопластины в программной среде Electronic Workbench (рис. 2) и измерив напряжение на ее отдельных элементах, акустический импеданс определяется по формуле

$$Z_2 = \frac{U_{R_I}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{R0_I}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \quad (4)$$

где U_C и U_{C0} – напряжение на конденсаторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду соответственно; U_{RI} и U_{R0I} – напряжение на резисторе $R_I = R - R_V$ и $R_{I0} = R_0 - R_V$, R и R_0, R_V – модуль импеданса при нагрузке пьезопластины на исследуемую среду, эталонную среду и воздух; f_r и f_{r0} – частота резонанса при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду; Z_0 – акустический импеданс эталонной среды.

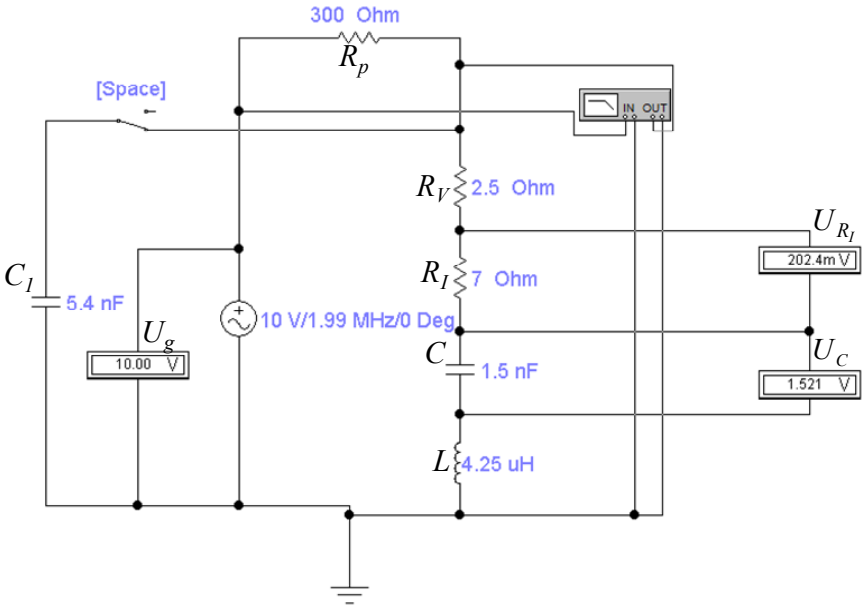


Рис. 2. Измерительная схема в программе Electronic Workbench

Результаты и обсуждения

Исследования проводились с использованием моторных масел марок Shell Helix 10W40, Лукойл 5W40 и ELF 5W40 при температурах (7 ± 2) °C, (23 ± 2) °C и (30 ± 2) °C, при сопротивлении развязки R_P = 300 Ом, напряжении генератора U_g = 10 В, с помощью продоль-

ной пьезопластины из ЦТС-19 размером 20×20×1 мм и геометрической емкостью $C_1 = 5{,}4$ нФ. Эталонная среда – вода ($Z_0 = 1{,}5$ МПа·с/м).

Результаты измерений амплитудно-частотных и эквивалентных электрических характеристик пьезопластины, нагруженной на машинное масло разных марок, приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Амплитудно-частотные и электрические эквивалентные характеристики продольной пьезопластины, нагруженной на моторное масло различной температуры**

Среда	f_r, МГц	f_a, МГц	U_r, В	R, Ом	C, нФ	L, мкГн
7 ± 2 °C						
Shell Helix 10W40	1,99	2,24	0,40	10,4	1,44	4,43
Лукойл 5W40	1,99	2,25	0,42	11,0	1,50	4,25
ELF 5W40	1,99	2,24	0,40	10,4	1,44	4,43
23 ± 2 °C						
Shell Helix 10W40	1,96	2,21	0,37	9,3	1,39	4,47
Лукойл 5W40	2,00	2,25	0,36	9,3	1,41	4,52
ELF 5W40	1,99	2,24	0,36	9,3	1,37	4,67
30 ± 2 °C						
Shell Helix 10W40	2,00	2,24	0,33	8,6	1,38	4,60
Лукойл 5W40	1,99	2,23	0,32	8,3	1,38	4,62
ELF 5W40	2,00	2,25	0,34	8,8	1,44	4,41

Результат измерения акустического продольного импеданса моторного масла при различных температурах приведен на графике (рис. 3). Из графика видно, что с увеличением температуры масла акустический продольный импеданс уменьшается в результате уменьшения его плотности и вязкости, вызванных тепловым расширением вещества. Следовательно, в процессе эксплуатации моторного масла его акустический импеданс изменяется с изменением температуры аналогичным образом, при этом в некоторых случаях может возникнуть необходимость его контроля непосредственно в процессе использования.

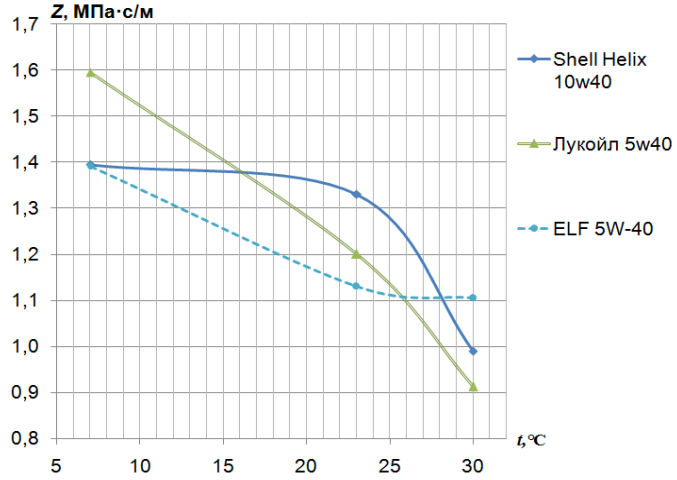


Рис. 3. График зависимости акустического продольного импеданса машинного масла от температуры

Заключение

Таким образом, в работе показано влияние температуры машинного масла на его акустический импеданс, измерение которого в процессе эксплуатации позволит контролировать эффективность его использования и, как следствие, повысить надежность и долговечность двигателей.

Список литературы

1. *Муравьева, О. В.* Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, Ю. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 3–10.

2. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

3. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683, no. 1. – P. 020156. – DOI: 10.1063/1.4932846

4. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств прутkового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / Муравьев В. В., Муравьева О. В., Петров К. В. // Дефектоскопия. 2017. – № 8. – С. 20–28.

5. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике : пер. с нем. / под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. – М. : Изд-во ин. лит., 1957. – 726 с.

6. *Богдан, О. П.* Исследование акустических свойств машинного масла различных марок / О. П. Богдан, М. А. Подсизерцева // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 170–175.

O. P. Bogdan, CSc, associate professor
M. A. Podsizertseva, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Research of Influence of Engine Oil Temperature on Its Acoustic Impedance

The results of the research of influence of engine oil temperature on its acoustic impedance by using the method based on the analysis of the piezoelectric-crystal plate AFC, which are immersed in the research liquid, and equivalent circuit of piezoelectric-crystal plate.

Keywords: acoustic impedance, engine oil, piezoelectric-crystal plate, equivalent electrical circuit.

УДК 534.641

О. П. Богдан, канд. техн. наук, доц.
М. А. Подсизерцева, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Оценка достоверности методики измерения акустического импеданса моторного масла

В статье представлены результаты оценки погрешности измерения акустического импеданса с использованием метода, основанного на анализе амплитудно-частотной характеристики пьезопластины, нагруженной на исследуемую среду, и ее эквивалентной электрической схемы.

© Богдан О. П., Подсизерцева М. А., 2018

Ключевые слова: акустический импеданс, моторное масло, контроль качества, пьезопластина, эквивалентная электрическая схема, достоверность.

Введение

Контроль качества – одна из наиболее важных и актуальных задач современной промышленности [1–4], при этом контроль качества необходим не только продукции и оборудованию, но и вспомогательным веществам, используемым при производстве, в том числе при работе различных механизмов. Надежная работа механизмов во многом зависит от качества смазывающих материалов, например автомобильного масла. Непрерывные количественные и качественные изменения масла в процессе эксплуатации создают необходимость контроля состояния машинного масла. Несмотря на наличие стандартизированных методов контроля машинного масла [5], существует необходимость в разработке более информативных и универсальных.

Разработан способ измерения акустического импеданса среды, позволяющий судить о качестве машинного масла, которое тесно связано с его физическими свойствами [6]. Однако для того чтобы определить возможность использования разработанного метода на производстве, необходимо оценить достоверность получаемых результатов измерения.

Устройство и методика измерения акустического импеданса

Измерение акустического импеданса машинного масла осуществляется с помощью установки, блок-схема которой показана на рис. 1.

Изменяя частоту сигнала генератора ГСС-20 1, поступающего через сопротивление развязки 2 на пьезопластину 6, с помощью осциллографа Rigol DS1102C 3 регистрируют амплитудно-частотную характеристику пьезопластины.

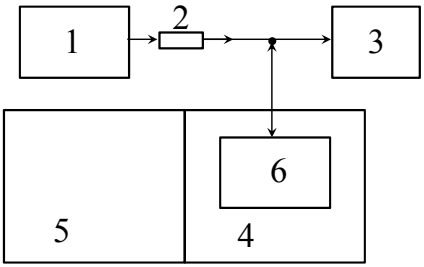


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения акустического импеданса: *1* – генератор ГСС-20; *2* – сопротивление развязки; *3* – осциллограф Rigol DS1102C; *4* – емкость с исследуемой жидкостью; 5 – емкость с эталонной жидкостью; *6* – пьезопластина

Измерение происходит в три этапа:

1. Измерение напряжения U_r, соответствующее частоте резонанса f_r свободной пьезопластины, для учета внутренних потерь.

2. Измерение частоты резонанса f_r, антирезонанса f_a и напряжения U_r, соответствующее частоте резонанса f_r пьезопластины, погруженной в эталонную среду 5.

3. Измерение частоты резонанса f_r и антирезонанса f_a, и напряжения U_r, соответствующее частоте резонанса f_r пьезопластины, погруженной в исследуемую среду 4.

По измеренным данным рассчитываются параметры эквивалентной электрической схемы замещения (сопротивление R, емкость C, индуктивность L) [5, 6], затем измеряются величины напряжения U_{RI} на резисторе R_I и напряжения U_C на конденсаторе C, используя которые вычисляют акустический импеданс исследуемой среды Z по формуле [6]:

$$Z = \frac{U_{R_I}^2 U_{C0}^2 Z_0 f_{r0}^2 R_{I0}}{U_{R0_I}^2 U_C^2 f_r^2 R_I}, \qquad (1)$$

где U_C и U_{C0} – напряжение на конденсаторе при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду соответственно; U_{RI} и U_{R0I} – напряжение на резисторе $R_I = R - R_V$ и $R_{I0} = R_0 - R_V$, R и R_0, R_V – модуль импеданса при нагрузке пьезопластины на исследуемую среду, эталонную среду и воздух; f_r и f_{r0} – частота резонанса при нагрузке пьезопластины на исследуемую и эталонную среду; Z_0 – акустический импеданс эталонной среды.

Результаты и обсуждения

Для измерения продольного акустического импеданса использовалась продольная пьезопластина 20×20×1 мм с геометрической емкостью 4,7 нФ, эталонная среда – вода (Z = 1,5·10^6 Па·с/м) при различных параметрах измерительной установки (сопротивление развязки R_p: 100 Ом, 200 Ом, 300 Ом, амплитуда сигнала, подаваемого с генератора, U_g: 10 В, 5 В). В качестве исследуемых сред использовались моторные масла Shell Helix 10W40, Лукойл 5W40, ELF 5W40. Погрешность измерений акустических импедансов исследуемых масел оценивалась по серии из 5 измерений с помощью критерия Стьюдента.

Случайную погрешность оценки акустического импеданса ΔZ моторного масла, серия измерений которых подчиняется распределению Стьюдента, можно определить как

$$\Delta Z = t_{\alpha,n}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{Z}-Z_i\right)^2}{n\left(n-1\right)}}, \qquad (2)$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности α для числа измерений n; $\overline{Z}$ – среднее математическое ожидание акустического импеданса. Для выборки из 5 измерений при доверительной вероятности 95 % коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n} = 2{,}33$. Доверительный интервал результатов измерений акустического импеданса равен $\left(\overline{Z}-\Delta Z, \overline{Z}+\Delta Z\right)$.

Результаты измерений акустического импеданса моторного масла разных марок с соответствующим доверительным интервалом для различных сопротивлений развязки и напряжения генератора представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Продольный акустический импеданс моторных масел при различных параметрах измерительной установки**

	Z, 10^6 Па·с/м		
R_p, Ом / Марка масла	100	200	300
	U_g = 5 В		
Shell Helix 10W40	1,31±0,31	1,08±0,26	1,02±0,25
Лукойл 5W40	1,26±0,17	1,11±0,14	1,16±0,20
ELF 5W40	1,18±0,21	1,11±0,21	1,21±0,16
	U_g = 10 В		
Shell Helix 10W40	1,45±0,18	1,33±0,21	1,34±0,20
Лукойл 5W40	1,36±0,08	1,20±0,10	1,17±0,08
ELF 5W40	1,37±0,12	1,10±0,08	1,45±0,32

Анализируя полученные данные, можно определить диапазон величины случайной погрешности, в пределах которого она изменялась в процессе измерения импеданса масла разных марок. Результаты сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что величина погрешности измерений акустического импеданса зависит от выбранных параметров измерительной установки. Наименьшая погрешность измерений акустического импеданса моторного масла наблюдается при сопротивлении развязки

$R_р$ = 100 Ом и амплитуде сигнала, подаваемого с генератора, U_g = 10 В, следовательно, эти параметры являются оптимальными для обеспечения достоверности результатов измерения.

Таблица 2. **Погрешность измерений при различных параметрах измерительной установки**

	Случайная погрешность измерений $\Delta Z, 10^6$ Па·с/м	
U_g, В / $R_р$, Ом	5	10
100	0,17…0,31	0,08…0,18
200	0,14…0,26	0,10…0,21
300	0,16…0,25	0,08…0,32

Для оценки адекватности полученных значений акустического импеданса выполнена оценка акустического импеданса машинного масла как

$$Z = \rho C_l, \tag{3}$$

где ρ – плотность моторного масла; C_l – скорость продольной волны в масле. Скорость звука измерялась импульсным методом, по времени прохождения ультразвуковой волны через слой масла известного размера. Результаты измерений скорости звука, плотности и акустического импеданса моторных масел приведены в табл. 3. Анализируя результаты измерений акустического импеданса, представленные в табл. 1 и табл. 3, видно, что значения, полученные с использованием импульсного метода, лежат в пределах доверительного интервала значений, измеренных с помощью разработанного метода. Следует отметить, что при реализации импульсного метода не оценивались погрешности измерения толщины слоя моторного масла и его плотности, следовательно, приведенная погрешность не является полной.

Таблица 3. **Результаты определения продольного акустического импеданса путем измерения скорости УЗ-волны**

Марка масла	C_l, м/с	ρ, кг/м^3	$Z, 10^6$ Па·с/м
Shell Helix 10W40	1460 ± 50	843	1,23 ± 0,04
Лукойл 5W40	1630 ± 130	772	1,26 ± 0,10
ELF 5W40	1660 ± 0,01	807	1,34 ± 0,00

Заключение

Таким образом, в работе показано, что разработанные метод и устройство могут быть использованы для измерения акустического импеданса машинных масел с достаточной точностью при оптимальном соотношении сопротивления развязки и напряжения, подаваемого с генератора на пьезопластину. При этом если необходимы более достоверные измерения с минимальной погрешностью, необходимо использовать осциллограф, позволяющий более точно измерять напряжение сигнала в области резонанса.

Список литературы

1. *Муравьева, О. В.* Факторы, влияющие на ослабление крутильных волн в трубах в условиях нагружения на контактные вязкоупругие среды / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, Ю. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2016. – № 9. – С. 3–10.

2. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

3. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. Сер. «Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures». – 2015. С. 020156. – DOI: 10.1063/1.4932846.

4. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

5. *Бергман, Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике : пер. с нем. / под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. – М. : Изд-во иностр. лит., 1957. – 726 с.

6. *Богдан, О. П.* Исследование акустических свойств машинного масла различных марок / О. П. Богдан, М. А. Подсизерцева // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – 716 с. – 32,2 МБ (PDF). – С. 170–175.

O. P. Bogdan, CSc in engineering, associate professor
M. A. Podsizertseva, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Confidence Estimation of Measuring Routine of Engine Oil Acoustic Impedance

The results of an estimation of the measurement error of acoustic impedance using the method based on the analysis of the piezoelectric-crystal plate *AFC, which are immersed in the research liquid, and equivalent circuit of* piezoelectric-crystal plate*.*

Keywords: acoustic impedance, engine oil, quality control, piezoelectric-crystal plate, equivalent electrical circuit, measuring routine/

УДК 620.179.16

И. В. Булдакова, аспирант
Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.
С. В. Казанцев, студент
М. А. Понькин, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Измерение напряжений в отдельных элементах рельса

Выполнена оценка механических напряжений в рельсе с использованием метода акустоупругости и электромагнитно-акустического преобразователя. Показано, что суммарные напряжения в рельсах складываются из растягивающих и сжимающих напряжений в отдельных его элементах.

Ключевые слова: метод акустоупругости, электромагнитно-акустический преобразователь, рельс, механические напряжения, скорость головной волны.

Введение

Большое число промышленных объектов имеют сложную форму поверхности. Это приводит к значительным трудностям при разработке средств и технологий ультразвукового контроля. Одним из таких объектов является рельс. Рельсы являются основным элементом верхнего строения железнодорожного пути. Они представляют собой стальные брусья с сечением в форме двутавровой балки, верхняя полка которой (головка рельса) контактирует с колесами подвижного состава, а нижняя (подошва рельса) закрепляется на опорах, головка и подошва соединены шейкой.

© Булдакова И. В., Волкова Л. В., Казанцев С. В., Понькин М. А., 2018

В процессе производства после прокатки, термической обработки и правки железнодорожных рельсов в них возникают остаточные напряжения. При эксплуатации рельса они изменяются в результате упругой и пластической деформации от контактного взаимодействия колеса с рельсом при многократном воздействии поездной нагрузки [1–4].

Существуют различные физические методы измерения остаточных напряжений в рельсах [5–10] – рентгеновский, магнитный, ультразвуковой, однако наиболее распространенными и простыми в применении являются механические методы, основанные на измерении деформаций и перемещений при разрезке металла объекта [11, 12]. Однако механические методы приводят к повреждению объекта и не охватывают весь объем продукции. Так на выходном контроле при производстве рельсов остаточные напряжения оцениваются по расхождению паза на торце полнопрофильной пробы рельса после ее прорезания в шейке [13].

В этом случае представляется перспективным использование ультразвукового метода контроля внутренних напряжений, в основе которого лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений, связанных через акустоупругие коэффициенты [14–17].

Постановка задачи

В предыдущих работах нами проводилось измерение напряжений по всему объему отрезка рельса [18–20]. Метод акустоупругости позволяет определить не поверхностные, а усредненные по толщине напряжения, в связи с чем суммарные напряжения, полученные в результате измерений, не дают точного представления о реальных напряжениях в отдельных элементах рельса, так как при размещении преобразователя на поверхности катания ультразвуковая волна встречает на своем пути разнознаковые области напряжений в головке, шейке и подошве.

Для оценки эффективности измерения механических напряжений в рельсе с использованием метода акустоупругости и электромагнитно-акустического преобразователя была проведена серия измерений цельного отрезка рельса типа Р65 и его отдельных элементов после разрезки.

Описание эксперимента

Измерения напряжений в рельсах проводились согласно методике контроля напряженно-деформированного состояния в железнодорожных колесах [21].

Для возбуждения ультразвуковых волн использовался бесконтактный электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМА), входящий в разработанный на кафедре «Приборы и методы измерения, контроля и диагностики» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова структуроскоп СЭМА [22]. ЭМА-преобразователь позволяет получить две поперечные волны, поляризованные перпендикулярно и вдоль оси рельса и распространяющиеся между головкой рельса и его подошвой. Измерения проводились с установкой преобразователя на элементы рельса со стороны поверхности катания и подошвы рельса в точках, расположенных на одинаковом расстоянии от торцов рельса и в центре (рис. 1). Для оценки погрешности серия измерений повторялась 5 раз.

Принятые сигналы обрабатывались в специализированном программном обеспечении Sensitive, которое позволяет с высокой точностью определять время распространения ультразвуковых волн и обрабатывать сигналы методами когерентного временного накопления и автокорреляции [22].

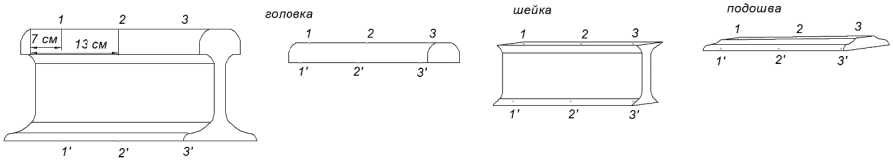


Рис. 1. Схема сканирования

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены средние значения напряжений в исследуемых рельсах.

Таблица 1. **Средние значения напряжений**

Фрагмент рельса	Напряжение при измерении с поверхности катания рельса, МПа	Напряжение при измерении с подошвы рельса, МПа
Цельный рельс	–60	–82
Головка	–31	–94
Шейка	–99	–96
Подошва	97	71

На рис. 2 представлена диаграмма напряжений в отдельных участках распиленного рельса в сравнении с цельным рельсом при измере-

нии напряжений с поверхности катания (рис. 2, *а*) и со стороны подошвы (рис. 2, *б*). Из диаграммы следует, что ультразвуковая волна, излученная с поверхности катания либо подошвы, взаимодействует на своем пути с растягивающими напряжениями в головке и шейке и сжимающими напряжениями в подошве. В результате измерений получаем, что напряжения в цельном рельсе в 2 раза превышают суммарные напряжения элементов рельса при контроле с поверхности катания, в то время как при контроле со стороны подошвы суммарные напряжения в 1,5 раза больше, чем в цельном рельсе. Однако следует учитывать, что рельс подвергался резке, что привело к изменению внутренних напряжений в рельсе.

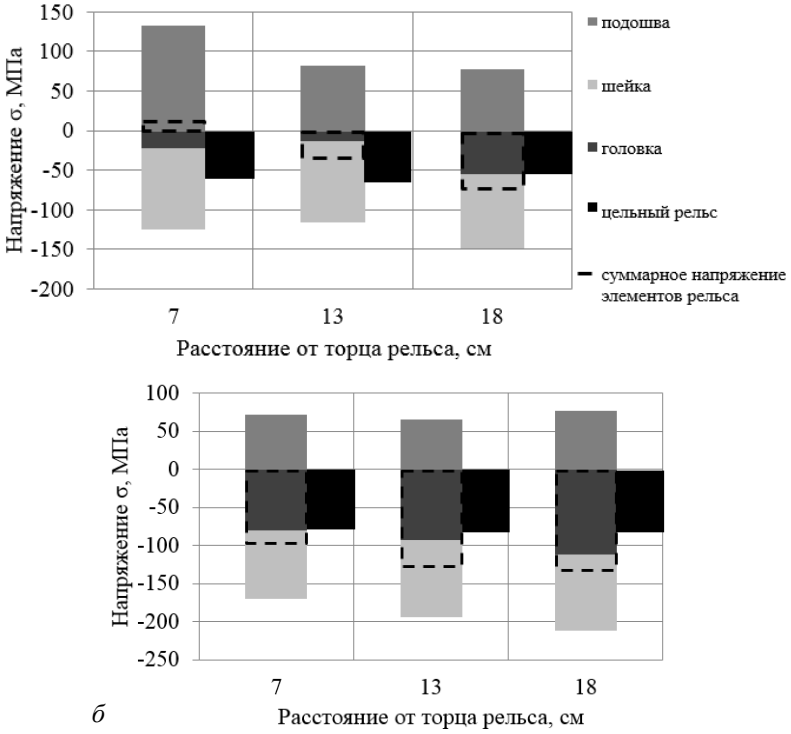


Рис. 2. Диаграммы распределения напряжений в отдельных элементах рельса при измерении с поверхности катания (*а*) и со стороны подошвы (*б*) рельса

В рамках данной работы также было проведено исследование зависимости скорости распространения головной волны от значения на-

пряжений в отдельных элементах рельса. Для возбуждения и регистрации головной волны использовался дефектоскоп DIO1000 и преобразователь ПЭП121-2,5-90Г. Скорость волны рассчитывалась с применением функции взаимной корреляции сигналов, зарегистрированных на исследуемых элементах рельса и эталонной мере СО-2, с предварительной передискретизацией в программной среде MathCAD.

В результате измерений скорость головной волны на поверхности катания головки имела значение 5862±4 м/с и 5883±1 м/с со стороны подошвы, притом что в цельном рельсе скорость составляла 5852±5 м/с. Из этого следует, что скорость головной волны на поверхности катания рельса после резки увеличилась на 10 м/с, при этом растягивающие напряжения в исследуемых областях уменьшились с 60 МПа до 31 МПа.

В случае измерения скорости головной волны отдельно на подошве рельса получаем значения 5859±1 м/с непосредственно на подошве и 5883±4 м/с со стороны поверхности катания, в то время как при измерении на подошве цельного рельса скорость головной волны имеет значение 5869±2 м/с. Из результатов измерения следует, что скорость головной волны в подошве рельса после резки уменьшилась на 10 м/с, причем в подошве рельса были выявлены сжимающие напряжения, в то время как при измерениях со стороны подошвы цельного рельса имели место быть растягивающие напряжения.

Выводы

Таким образом, установлено, что каждый отдельный элемент рельса (головка, шейка, подошва) имеют индивидуальные значения напряжений. Непосредственное измерение местных, а не средних, напряжений в реальных сложных конструкциях, таких как рельсы, осуществить очень трудно, однако предложенный способ измерения механических напряжений в рельсах позволяет относительно точно определить вид и значение внутренних напряжений в рельсе.

Список литературы

1. Влияние наработки рельсов на скорость поверхностных и головных ультразвуковых волн / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, А. М. Глезер, В. Е. Громов // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 11. – С. 42–47.

2. *Муравьев, В. В.* Связь глубины обезуглероженного слоя в рельсах со скоростью рэлеевских волн и коэрцитивной силой / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, С. В. Леньков // Сталь. – 2017. – № 8. – С. 42–44.

3. *Муравьев, В. В.* Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков // Дефектоскопия. – 2016. – № 11. – С. 50–58.

4. Измерение температуры рельсов в бесстыковом пути / В. А. Куликов, В. В. Муравьев, К. А. Никитин, Г. В. Брагин // Измерительная техника. – 2017. – № 5. – С. 53–55.

5. *Муравьев, В. В.* К возможности диагностирования рельсов в эксплуатации акустико-эмиссионным методом / В. В. Муравьев, М. В. Муравьев, Т. В. Муравьев // Дефектоскопия. – 2008. – № 1. – С. 42–50.

6. *Муравьев, М. В.* Способ диагностирования рельсовых плетей металлического моста и устройство для его осуществления / М. В. Муравьев, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, Т. В. Муравьев патент на изобретение RUS 2284519 14.02.2005

7. *Муравьев, В. В.* Разработка акустико-эмиссионной методики контроля рельсов в эксплуатации / В. В. Муравьев, М. В. Муравьев, Т. В. Муравьев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2005. – № 12. – С. 62–72.

8. *Муравьев, В. В.* Неразрушающий контроль структурно-механического состояния рельсов текущего производства по скорости ультразвуковых волн / В. В. Муравьев, Е. В. Бояркин // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 24–33.

9. *Муравьев, В. В.* Ультразвуковой метод оценки структурно-механического состояния рельсовой стали / В. В. Муравьев, Е. В. Бояркин, А. Л. Бобров // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 3. – С. 37–40.

10. *Муравьев, В. В.* Взаимосвязь структуры и твердости сталей со скоростью объемных и поверхностных акустических волн // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1991. – № 10. – С. 100–102.

11. *Смирнов, А. Н.* Разрушение и диагностика металлов / А. Н. Смирнов, В. В. Муравьев, Н. В. Абабков. – Москва ; Кемерово, 2016. – 479 с. – (Техническое диагностирование).

12. *Серегин, Г. В.* Ускоренный метод оценки предела выносливости транспортных металлов / Г. В. Серегин, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 11. – С. 11–13.

13. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изм. № 1). – Введ. 2014–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 101 с.

14. *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.

15. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

16. Ultrasonic method for estimation the stress state in rails / V. V. Muraviev, L. V. Volkova, A. V. Platunov, V. E. Gromov, S. L. Korotkov // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020157. – Doi: 10.1063/1.4932847.

17. 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.

18. *Muraviev, V. V.* Analysis of stress distribution in a rail by electromagnetic-acoustic method / V. V. Muraviev, L. V. Volkova, I. V. Buldakova // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785. – P. 030016. – Doi: 10.1063/1.4967037.

19. Применение ультразвуковых волн для определения механических напряжений в рельсах / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, И. В. Булдакова, Будрин А. Ю., С. В. Казанцев // Сварка и диагностика (Екатеринбург, 22–23 нояб. 2016 г.). – С. 446–451.

20. 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.

21. 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.

22. Прибор для измерений скорости акустических волн в металлах и сплавах / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, С. В. Леньков, Н. Н. Зверев // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 3. – С. 142–146.

I. V. Buldakova, postgaduate student
L. V. Volkova, CSc in engineering, associate professor
S. V. Kazantsev, student
M. A. Ponkin, student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Stress Measurement in Individual Rail Elements

The mechanical stresses in the rail are evaluated using the acoustoelasticity method and the electromagnetic-acoustic transducer. Shown that the combined stress in the rails are composed of tensile and compressive stresses in its individual elements.

Keywords: acoustoelasticity method, electromagnetic-acoustic transducer, rail, mechanical stresses, lateral wave velosity

УДК 620.179.16

Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование акустической анизотропии листового проката с использованием продольной и изгибной волн

В статье представлены результаты исследований текстурной анизотропии в листовом прокате из низкоуглеродистой стали электромагнитно-акустическим методом. Рассчитаны скорости симметричной и антисимметричной волн Лэмба, проведена оценка коэффициентов анизотропии материала.

Ключевые слова: анизотропия свойств, коэффициенты анизотропии, листовой прокат, волны Лэмба.

Введение

Металлические листы изготавливают методом проката материала при помощи прокатных валков, который придает кристаллографическую текстуру металлу и проявляется в значительной анизотропии механических свойств. Крайне важно, чтобы конечные свойства металла соответствовали процессу, который будет применяться на следующей стадии производства продукта. Так, одним из основных пользователей стального листового проката является трубное производство. Неправильная текстура приводит к увеличению потерь и затрат на производство до такой степени, что металл может фактически разорваться в процессе производства. Производители листового металла обычно не используют неразрушающие методы контроля для контроля текстуры в процессе его производства или большинство из них склонны выполнять лишь «выборочные проверки» на конечном продукте.

Единственным способом полностью отобразить кристаллографическую текстуру является использование многократного сканирования рентгеновскими лучами объекта контроля. Однако данный метод занимает много времени и средств и не может быть реализован в непре-

© Волкова Л. В., 2018

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

рывном потоке производства. На сегодняшний момент существует большое количество экспериментальных работ, которые исследуют связь акустических колебаний и волн с упругими и пластическими свойствами проката [1–6].

Ультразвуковые методы измерения не дают представления о кристаллографической текстуре материала, как рентгеновские измерения, но могут дать представление о некоторых из наиболее важных параметров текстуры, которые относятся к формуемости металла. Так, по изменению скоростей ультразвуковых волн возможно рассчитать коэффициенты упругой анизотропии металла, коэффициенты нормальной и плоскостной анизотропии.

Сведения из теории

Изменение пластического поведения металла листов от направления оценивается величиной, называемой коэффициентом Ланкфорда или коэффициентом анизотропии [7]. Этот коэффициент определяется при одноосных испытаниях на растяжении на образцах листов в виде полосы и оценивается как отношение деформации в направлениях ширины и толщины образца соответственно и может быть рассчитан как

$$R = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}}, \qquad (1)$$

где b_0 и b – начальная и конечная ширина; t_0 и t – начальная и конечная толщина образца соответственно.

Изменение свойств металла в направлении, перпендикулярном в плоскости листового проката, в зависимости от свойств в плоскости листа оценивается коэффициентом нормальной анизортропии R_n, представляющей усредненный коэффициент анизотропии, измеренный вдоль, поперек и под углом 45° к направлению прокатки [6]:

$$R_n = 0,25 \cdot (R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}). \qquad (2)$$

Коэффициент плоскостной анизотропии R_p в заданном направлении представляет собой разницу между коэффициентом нормальной анизотропии и коэффициентом анизотропии R_α, измеренным в заданном направлении. Обычно R_α определяют в направлении под углом 45° к направлению прокатки. Тогда среднее значение коэффициента плоскостной анизотропии выражается формулой [6]

$$R_p = 0,25 \cdot (R_0 - 2 \cdot R_{45} + R_{90}) . \quad (3)$$

Описание эксперимента

Российскими и зарубежными учеными разработаны методики измерения текстуры с использованием ультразвуковых колебаний [7–9]. Большая часть этой работы была выполнена с использованием узкополосных электромагнитно-акустических преобразователей, генерирующих ультразвуковые волны без контакта с образцом.

Для оценки анизотропии тонких листов в данной работе был использован несколько иной подход, использовался широкополосный ЭМАП для выполнения измерений в попытке повысить точность измерений и зафиксировать волны различных мод: продольной и изгибной волны Лэмба.

Исследования акустической анизотропии листов проводились с использованием специализированного прибора СЭМА (структуроскоп электромагнитно-акустический). Раздельно-совмещенный ЭМА-преобразователь обеспечивает возможность излучения и приема продольной и изгибной волн Лэмба при фиксированной базе прозвучивания между ЭМА-излучателем и ЭМА-приемником (рис. 1). В процессе измерений датчик поворачивался на угол α от 0° до 360° от направления прокатки листа с шагом 10°.

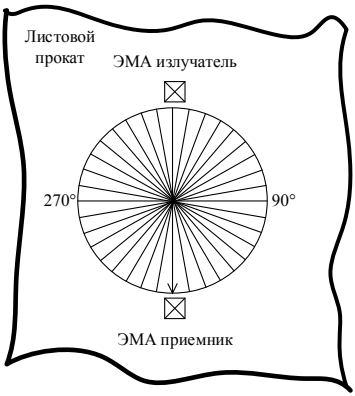


Рис. 1. Схема установки преобразователя на поверхности листа

Регистрация принятых сигналов производится с использованием специализированного программного обеспечения «Prince» (рис. 2).

При этом на экране наблюдается два импульса, соответствующих продольной и изгибной волне Лэмба.

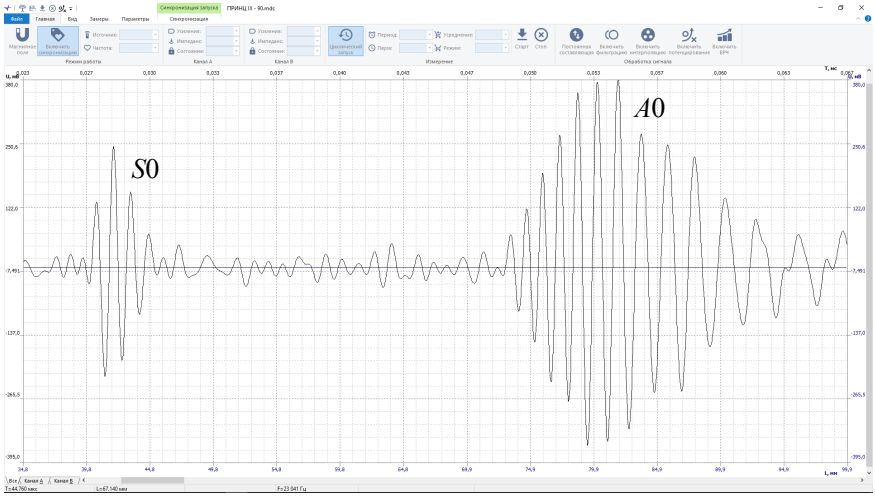


Рис. 2. Осциллограмма принятых импульсов

Скорость волн Лэмба определяется по формуле

$$C_{0...\alpha} = \frac{l}{t_{0...\alpha}}, \tag{4}$$

где $C_{0...\alpha}$ – скорости распространения волн Лэмба в направлении α относительно направления прокатки$ $t_{0...\alpha}$ – время между прошедшим и зондирующим импульсами в направлении α относительно направления прокатки$ l – база между ЭМА-излучателем и ЭМА-приемником.

Коэффициент упругой анизотропии R_{am} m-й моды волны Лэмба рассчитывается по формуле

$$R_{am} = \left(1 - \frac{C_0}{C_\alpha}\right) \cdot 100\% = \frac{\Delta t}{t_0} \cdot 100\%, \tag{5}$$

где $\Delta t = t_0 - t_\alpha$.

Для оценки величины Δt была использована функция автокорреляции импульсов в программном обеспечении «Prince», позволяющая

совмещать сигналы двух направлений на экране, тем самым наблюдая разницу прихода двух волн в зависимости от направления проката.

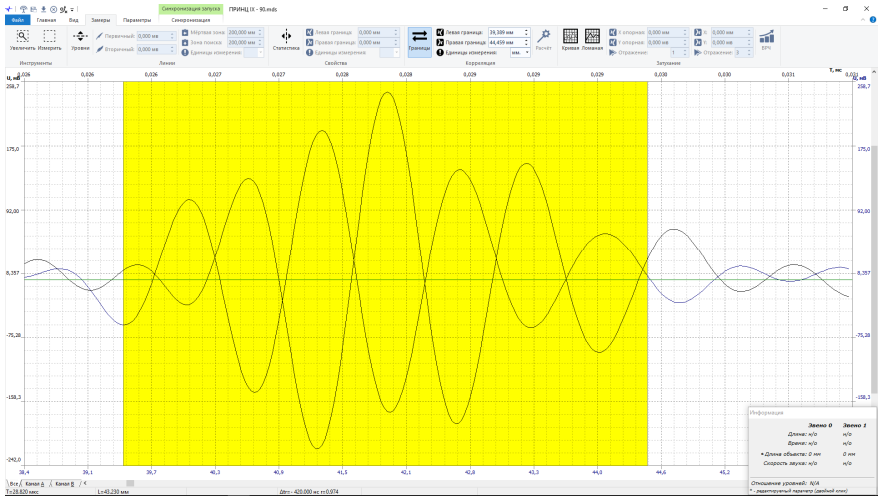


Рис. 3. Корреляционная обработка сигналов двух направлений в программном обеспечении «Prince»

Результаты и их обсуждение

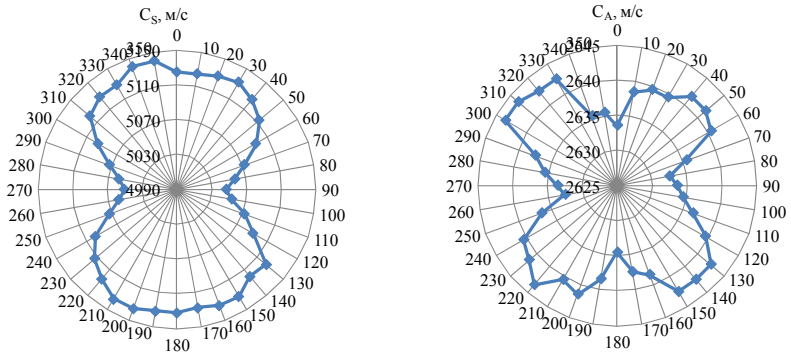
Исследования проведены на двух образцах – вырезках металлургического холоднокатаного (х/к) проката из сталей марки 08пс и DC01 (зарубежный аналог марки 08пс) рулонного профиля толщиной 0,4 и 0,45 мм, изготовленного по ГОСТ 16523-97 «Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения».

Результаты исследований скоростей симметричной C_S и антисимметричной C_A волн Лэмба для двух листов представлены на рис. 4.

Ввиду разной чувствительности различных мод волн Лэмба к анизотропии свойств используется нормированный коэффициент анизотропии R_{an} [8]:

$$R_{an} = {R_{am}}/{K_m}, \qquad (6)$$

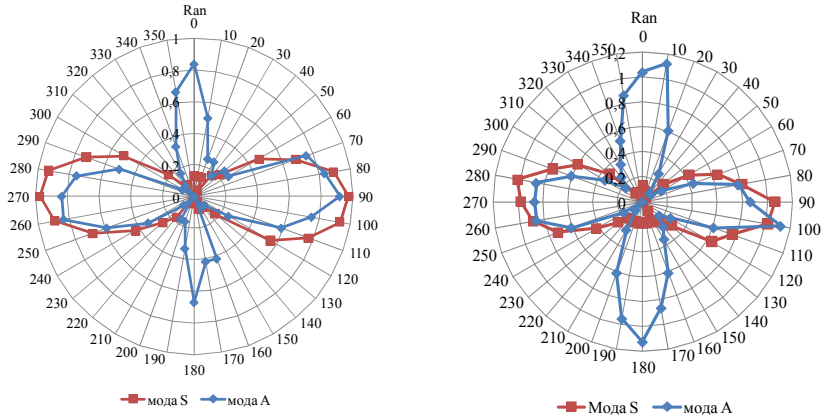
где K_m – масштабный коэффициент, нормирующий значения чувствительности данной моды к уровню чувствительности бездисперсионной моды sh_0 [9].



а *б*

Рис. 4. Угловое распределение скорости моды S_0 и A_0 волны Лэмба соответственно

Картина углового распределения коэффициентов анизорторпии симметричной *S* и антисимметричной *A* волн Лэмба для двух листов представлены на рис. 5.



а *б*

Рис. 5. Угловое распределение нормированных коэффициентов анизотропии моды S_0 и A_0 волны Лэмба для листа 1 (*а*) и 2 (*б*)

Из индикатрис изменения скоростей волн и коэффициентов анизотропии видно, что для исследованных образцов с увеличением коэф-

фициента анизотропии ярче выражается минимум в индикатрисе скорости. Максимум – коэффициент анизотропии.

По результатам углового распределения коэффициентов анизотропии была проведена оценка измеряемых при механических испытаниях коэффициента нормальной анизотропии и коэффициента плоскостной анизотропии, результаты полученных значений приведены в таблице.

Коэффициенты нормальной и плоскостной анизотропии

№ листа	Волна S_0		Волна A_0	
	R_n	R_p	R_n	R_p
1	0,36	0,19	0,52	0,36
2	0,31	0,27	0,52	0,43

В исследуемых листах коэффициент нормальной анизотропии меньше 1, следовательно, листовой прокат деформируется больше по толщине, чем по ширине, что вызывает его утончение при штамповке.

Выводы

Результаты экспериментальных исследований образцов тонколистового проката из низкоуглеродистой стали позволили оценить:

– угловое распределение скорости симметричной и антисимметричной волн Лэмба;

– коэффициент анизотропии акустических свойств;

– неравномерность анизотропии по площади образцов.

Экспериментально обнаружены различия в характеристиках углового распределения скоростей симметричной и изгибной волн Лэмба, имеющих ортогональное направление преимущественных векторов смещений относительно направления прокатки. Коэффициент нормальной анизотропии листового проката можно определить ультразвуковым методом по величине скоростей ультразвуковых волн вдоль и поперек направления проката.

Список литературы

1. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020156.

2. Electromagnetic-acoustic structural analysis of rolled bars / O. V. Muravieva, V. V. Muraviev, M. A. Gabbasova, K.V. Petrov, V.A. Zorin // AIP Publishing. – 2016. – Vol. 1785. – P. 030017.

3. *Murav'ev, V. V.* Connection between the Properties of 40Kh-Steel Bar Stock and the Speed of Bulk and Rayleigh Waves / V. V. Muraviev, O. V. Murav'eva, K. V. Petrov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, no. 8. – Pp. 560–567.

4. *Муравьев, В. В.* Исследование акустоупругих характеристик тонких проволок / В. В. Муравьев, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 7. – С. 679–684.

3. Способ определения коэффициента нормальной анизотропии прокатных листовых материалов : пат. 2025727 Рос. Федерация / Серебряный В. Н., Мишакин В. В.

4. Влияние структурных факторов на анизотропию ударной вязкости листового проката из ферритно-перлитных сталей / В. М. Горицкий, М. А. Лушкин, О. В. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 8. – С. 16–21.

5. *Матюк, В. Ф.* Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3. – С. 15–42.

6. *Lankford, W. I.* New criteria for predicting the press performance of deep-drawing sheets / W.I. Lankford, S.C. Snyder, J.A. Bauscher // Trans. ASM. – 1950. – Vol. 42. – Pp. 1196–1232.

7. Определение степени анизотропии тонколистового стального проката электромагнитно-акустическим методом с использованием волн Лэмба / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Бритвин, А. М. Кашин, И. Н. Уткин // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 2. – С. 34–41.

8. *Муравьев, В.В.* Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Л. В. Волкова // Сталь. – 2016. – № 10. – С. 75–79.

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

L. V. Volkova, CSc in engineering, associate professor
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Research of Acoustic Anisotropy of Sheet Metal Using Longitudinal and Flexural Waves

The paper presents the results of researches of textural anisotropy in sheet steel from low-carbon steel by an electromagnetic-acoustic method. The velocities of the Lamb waves of symmetric and antisymmetric Lamb waves are calculated, and the anisotropy coefficients of the material are estimated.

Keywords: anisotropy of properties, anisotropy coefficients, sheet rolling, Lamb waves

УДК 621.318

М. А. Гусев, инженер-программист
В. А. Колясев, мл. науч. сотр.
А. Г. Копытов, вед. электроник
E-mail: gep@ftiudm.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Измерительный блок сканирующего коэрцитиметра

Работа посвящена методам и аппаратуре измерения механических свойств, структуры и напряженно-деформированных состояний изделий из ферромагнитных материалов по их магнитным характеристикам. Приводится описание устройства и принципа работы сканирующего коэрцитиметра с намагничивающим устройством в виде постоянных магнитов и двумя феррозондами в качестве чувствительных элементов.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, магнитные параметры материала, коэрцитивная сила, феррозонд, сканирующий коэрцитиметр**,** структуроскоп.

Введение

Неразрушающий контроль широко применяется как для диагностики состояния эксплуатирующихся конструкций, так и для определения свойств материала на стадии его изготовления. Для определения структуры, механических свойств и напряженно-деформированного состояния изделий из ферромагнитных материалов широкое применение нашли магнитные структуроскопы. В основе принципа действия этих устройств лежит определение того или иного магнитного параметра материала, однозначно связанного с его механическими характеристиками. Так, в известных структуроскопах-коэрцитиметрах [1] такой

© Гусев М. А., Колясев В. А., Копытов А. Г., 2018

величиной является коэрцитивная сила H_c, которая во многих случаях надежно коррелирует с такими механическими параметрами, как твердость, предел текучести и т. п.

Датчик таких приборов, как правило, представляет собой электромагнит с П-образным магнитопроводом, в магнитной цепи которого расположен нуль-индикатор магнитного поля, и выполнен накладным, или «приставным» (по этой причине данный прибор иногда называют «приставным коэрцитиметром»). При контроле датчик устанавливается полюсами электромагнита на поверхность изделия, после чего производится двукратное разнополярное намагничивание контролируемого участка с последующим размагничиванием плавно нарастающим током и измерение тока размагничивания I_p, при котором нуль-индикатор фиксируют нулевое значение магнитного поля. Ток I_p пропорционален коэрцитивной силе H_c материала изделия и зависит от его формы и размеров, поэтому градуировка прибора в единицах измерения H_c (А/см) производится по специальным контрольным образцам.

Данный структуроскоп обладает существенными недостатками: ограниченное быстродействие (цикл измерений около 5–10 сек); большое энергопотребление; зависимость показаний прибора от размеров контролируемых изделий; невозможность построения непрерывной картины распределения H_c по изделиям с развитой поверхностью и протяженным объектам; неудобство крепления датчика на объекте в случае длительного мониторинга его состояния.

Физические основы сканирующего коэрцитиметра

От указанных недостатков в значительной мере свободны так называемые «сканирующие коэрцитиметры» (СК) [2, 3], принцип действия которых поясняется рис. 1.

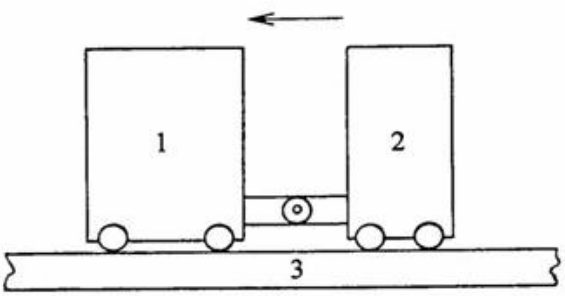


Рис. 1. «Сканирующий коэрцитиметр»
1 – намагничивающее устройство; *2* – блок измерения; *3* – изделие

Датчик коэрцитиметра состоит из намагничивающего устройства *1* и измерительного блока *2*, перемещающихся вдоль заданного направления по поверхности контролируемого изделия *3*. Намагничивающее устройство с направлением намагничивания, перпендикулярным направлению перемещения, образует в изделии полосу с остаточной намагниченностью, при этом напряженность магнитного поля H над намагниченной полосой, фиксируемая блоком измерения, пропорциональна коэрцитивной силе H_c (рис. 2). Возможно измерение как касательной (тангенциальной) составляющей магнитного поля H_τ, так и нормальной составляющей H_n. Предпочтительным является измерение напряженности поля H_n двумя преобразователями магнитного поля (например, датчиками Холла), расположенными симметрично относительно нейтральной плоскости намагниченной полосы в изделии после удаления намагничивающего устройства (силовые линии остаточного магнитного поля в изделии показаны стрелками на рис. 2). При этом преобразователи включены последовательно-согласно по отношению к магнитному полю намагниченной полосы. Такое включение обеспечивает увеличение полезного сигнала и устранение влияния на показания прибора внешних однородных магнитных полей, например, поля Земли.

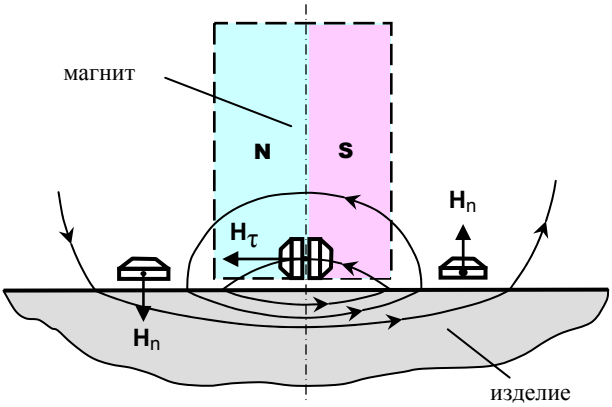


Рис. 2. Схема измерения магнитного поля намагниченной полосы

Особенности выполнения измерительного блока СК

Поскольку показания коэрцитиметра формируются непосредственно из сигналов преобразователей магнитного поля, то к последним

предъявляются достаточно жесткие требования с точки зрения погрешности измерения. Так, известные датчики Холла, несмотря на широкий диапазон измерения, имеют такие недостатки, как низкая стабильность нулевого уровня (дрейф нуля) и коэффициента преобразования, их существенная зависимость от температуры и напряжения питания датчика, а также высокий уровень собственных шумов. Кроме того, датчикам Холла присущ существенный гистерезис, уровень которого производителем, к сожалению, обычно не указывается (Solid State Hall Effect Sensors SS490 Series. – Honeywell. Sensing and Control. www.honeywell.com).

Поскольку диапазон изменения составляющих H_n магнитного поля в сканирующих коэрцитиметрах, как правило, не превышает 12–15 А/см, то наиболее подходящим для указанной задачи является разработанный и представленный в 2015 г. корпорацией Texas Instruments датчик DRV425, представляющий собой полностью интегральный феррозонд. Указанный датчик обладает стабильными и строго нормированными параметрами в широком диапазоне температур и питающих напряжений. Единственным недостатком можно считать относительно невысокий верхний предел чувствительности ±16 А/см. Более подробно параметры указанного датчика приведены в сопутствующей документации (DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor. DATASHEET: SBOS729A – OCTOBER 2015–REVISED MARCH 2016. www.ti.com.).

Конструкция и устройство блока измерения

Ниже приводится конструкция блока измерения сканирующего коэрцитиметра, построенная на указанных преобразователях магнитного поля. На рис. 3 показан внешний вид блока.

Устройство блока измерений представлено на рис. 4, структурная схема – на рис. 5. В состав блока входят два феррозондовых датчика, модуль измерения перемещения и скорости (оптический датчик (ОД) – пара светодиод-сдвоенный фототранзитор и измерительное колесо с отверстиями), модули оцифровки сигналов с ОД и феррозондов, модуль управления связи с компьютером.

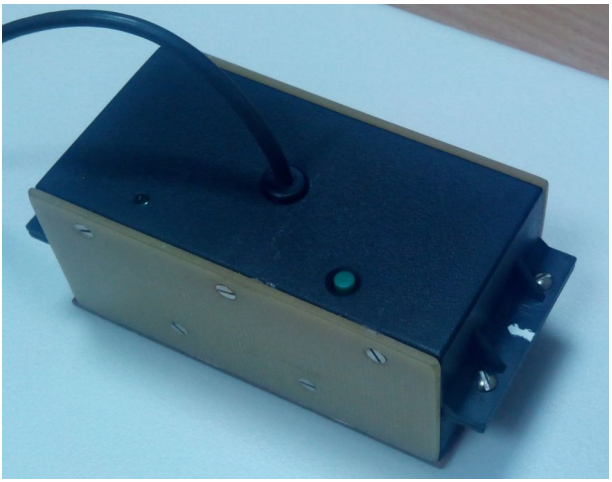


Рис. 3. Внешний вид блока измерения

Оси чувствительности феррозондов перпендикулярны поверхности контролируемого объекта и расположены на расстоянии 18 мм друг от друга и на расстоянии 5 мм от поверхности объекта.

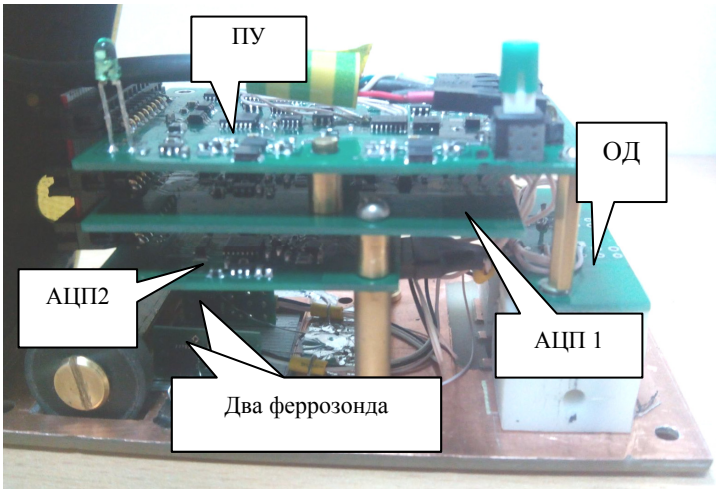


Рис. 4. Внутреннее устройство блока измерений: ПУ – модуль управления и связи с компьютером, ОД – модуль оптичиского датчика перемещения, АЦП1 – модуль оцифровки сигналов с ОД, АЦП2 – модуль оцифровки сигналов с феррозондов.

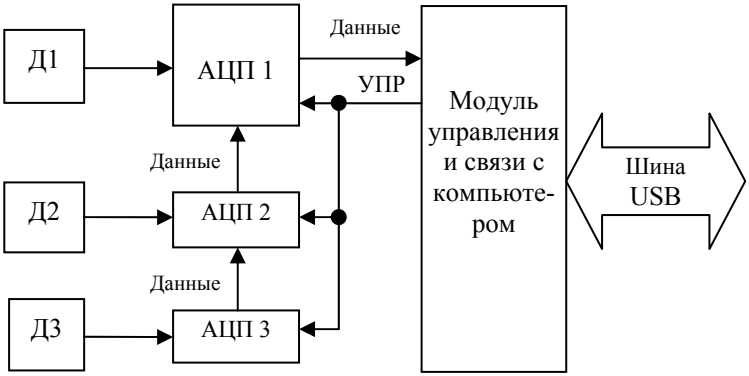


Рис. 5. Структурная схема блока измерений:
Д1 – датчик перемешения; Д2, Д3 – феррозондовые датчики

Выводы

Применение современных электронных компонентов (прежде всего, феррозондов и АЦП) позволило существенно повысить точность измерения напряженности магнитного поля и, соответственно, достоверность контроля ферромагнитных материалов по величине остаточной намагниченности. Это расширяет функциональные возможности аппаратуры применительно к диагностике и контролю структуры, механических свойств и напряженно-деформированного состояния изделий из ферромагнитных материалов.

Список литературы

1. *Горкунов, Э. С.* Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (обзор) / Э. С. Горкунов, В. А. Захаров // Дефектоскопия. – 1995. – № 8. – С. 69–88.

2. *Захаров, В. А.* Коэрцитиметры с передвижным магнитным устройством / В. А. Захаров, Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужицкий // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 6–14.

3. Информационно-измерительная система для неразрушающего магнитного контроля в режиме сканирования / С. М. Молин, В. А. Захаров, А. А. Зотов, М. А. Гусев // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. регион. науч.-техн. очно-заоч. конф. (г. Ижевск, 23 мая 2015 г.) / науч. ред. В. А. Куликов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – 308 с. – С. 249–255.

M. A. Gusev, programming engineer
V. A. Koliasev, research assistant
A. G. Kopytov, electronics engineer
E-mail: gep@ftiudm.ru
Physical-Technical Unstitute UB RAS, Izhevsk, Russia

Measuring Unit of the Scanning Coercimeter

The work is devoted to methods and equipment for measuring mechanical properties, structure and stress-strain states of products made of ferromagnetic materials by their magnetic characteristics. A description is given of the device and the principle of operation of the scanning coercimeter with a magnetizing device in the form of permanent magnets and two ferroprobe sensors as sensing elements.

Keywords: ferromagnetic materials, magnetic material parameters, coercive force, ferro-probe, scanning coercimeter, structuroscope.

УДК 681.2.088

Д. В. Злобин, канд. техн. наук, доц.
В. Ф. Нуриев, студент
Л. В. Гущина, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Прибор для измерения скорости акустических волн

В статье описаны подходы к разработке прибора для измерения скорости распространения акустических волн импульсным методом под управлением микроконтроллера.

Ключевые слова: ультразвук, скорость акустических волн, микроконтроллер, структуроскопия.

Введение

Измерение скорости распространения ультразвуковых волн с высокой точностью необходимо для исследования акустических свойств материалов, измерения модулей упругости, размеров объектов, а также структуроскопии. Известно, что скорость ультразвука связана со

© Злобин Д. В., Нуриев В. Ф., Гущина Л. В.

структурным состоянием сталей и сплавов [1]. Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы контроля структурного состояния металлов является акустическая структуроскопия, основанная на измерении скорости распространения упругих волн в контролируемой среде. Важность данного параметра обусловлена его тесной корреляцией со структурой исследуемого образца, связанной с режимами термической обработки, химическим составом, наличием внутренних напряжений и т. д. Однако в большинстве случаев регистрация изменений перечисленных свойств объекта контроля требует весьма высокой точности измерения скорости ультразвуковой волны, которую не в состоянии обеспечить традиционные дефектоскопы.

Цель работы состоит в разработке прибора с использованием микроконтроллера, позволяющего существенно упростить процесс разработки прибора, а также улучшить его точностные характеристики.

Описание прибора и принцип действия

Ранее был разработан прибор для измерения скорости акустической волны (ИСАВ), работающий по принципу автоциркуляциии акустических импульсов. Схема проведения измерений прибором ИСАВ с датчиком рэлеевской (поверхностной) волны показана на рис. 1. Автоциркуляция возникает за счет того, что принятый датчиком 2 импульс инициирует следующий зондирующий импульс и далее процесс повторяется. В результате измеряемым параметром является частота автоциркуляции импульсов, что позволяет производить измерение с достаточно высокой точностью. Однако метод не позволяет проводить измерения для типов волн с малым затуханием (например, объемные продольная и поперечная волны). Это связано с тем, что в интервалы измерения поступают импульсы от предыдущих посылок, что приводит к ложным срабатываниям порогового элемента электрической схемы.

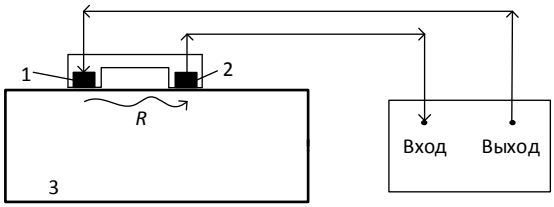


Рис. 1. Схема проведения измерений прибора ИСАВ:
1 – излучающий и *2* – приемный преобразователи, *3* – объект контроля

Для преодоления этого недостатка было принято решение о разработке прибора с использованием импульсного метода измерения скорости. При этом промежуток времени между измерениями, регулируемый программно, даст возможность минимизировать влияние импульса предыдущей посылки.

Для операций управления блоками прибора и обработки сигналов применен микроконтроллер семейства AVR ATmega328 [2], имеющий следующие характеристики: рабочая тактовая частота 16 МГц, объем flash-памяти (память программ) 32 Кб, объем SRAM (ОЗУ) 2 Кб, объем EEPROM-памяти 1 Кб, напряжение питания 1,8–5,5 В, разрешение АЦП 10 бит.

В языке программирования контроллера предусмотрены готовые функции для формирования импульсов и задержек, для измерения длительности импульсов, для установки режима работы выводов как вход или выход и т. д [3]. Однако они не позволяют добиться желаемой точности измерения и не обеспечивают формирование стабильных сигналов. Это связано с тем, что высокоуровневые команды среды Arduino IDE, построенной на основе языка C/C++, интерпретируются в достаточно большой объем машинного кода, занимающего процессорное время, а работа высокоуровневых функций задержек (например delay) не позволяют добиться точности и стабильности на частотах выше 50 кГц. Решением проблемы стало использование команд непосредственного управления регистрами портов и счетчиков (например: DDRB – команда, задающая режим работы порта на вход или выход, PORTB – непосредственная запись байта в порт. Такой подход существенно сократил время выполнения отдельных команд (до уровня отдельных тактов), однако его недостатком является возможная аппаратная несовместимость кода с другими моделями контроллеров семейства AVR.

ATmega328 включает в себя два 8-битных счетчика (T0 и T2) и один 16-битный (T1). Для проекта целесообразнее использовать T1, так как он имеет больший период переполнения (около 4 мс при частоте 16 МГц).

Изначально все счетчики сброшены регистром TCCRXB. Используя регистр TIMSK, задается режим прерывания по захвату по переднему фронту импульса, реализованный на выводе ICP1. После формирования зондирующего импульса, путем задания регистром PORTB высокого и низкого уровня, включается счетчик T1 и начинается подсчет тактовых импульсов до прерывания по захвату. Измерения про-

изводятся несколько раз для усреднения показаний. Результаты экспериментов показали, что результирующая погрешность измерения составляет величину порядка периода тактовой частоты микроконтроллера. Блок-схема программного алгоритма работы устройства представлена на рис 2.

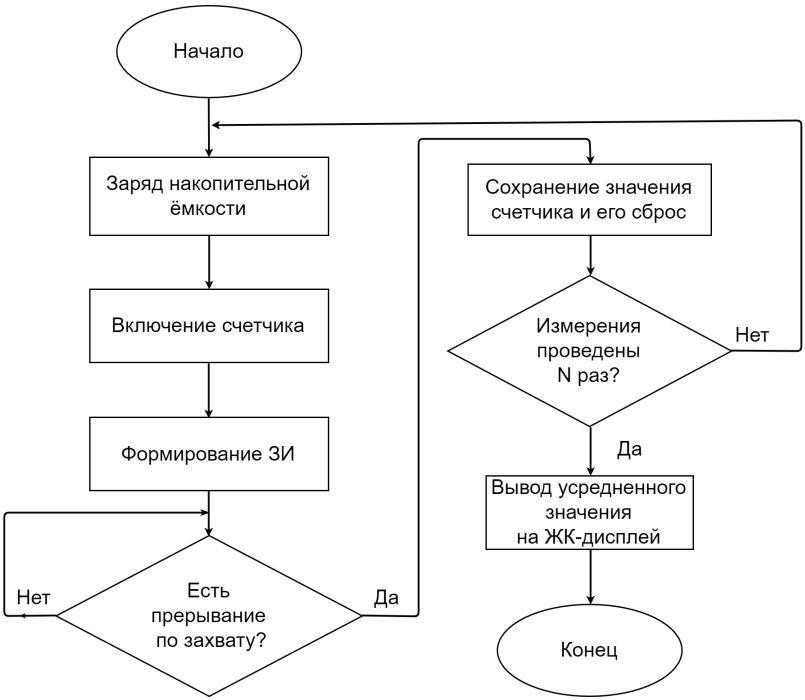


Рис. 2. Блок схема программы

Преимущество использования МК заключается в том, что программными средствами могут быть настроены все временные параметры рабочего цикла (длительность ЗИ, величина мертвой зоны и т. п.) Кроме того, с помощью МК и усилителя, управляемого напряжением, достаточно просто реализуется система автоматической регулировки усиления (АРУ), позволяющая минимизировать погрешность измерения времени, связанную с флуктуациями амплитуды принятого импульса. Также к достоинствам использования МК можно отнести простоту организации как органов управления, так и индикации ре-

зультатов измерения (вывод на ЖК-дисплей). Блок-схема работы устройства показана на рис. 3.

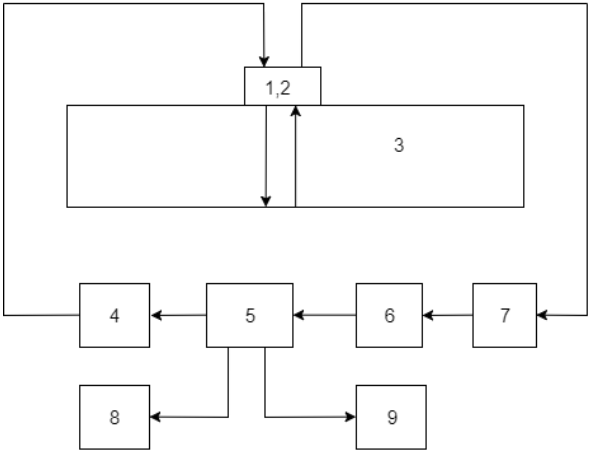


Рис. 3. Блок-схема устройства: *1* – излучающий преобразователь, *2* – приемный преобразователь, *3* – объект контроля, *4* – повышающий преобразователь, *5* – микроконтроллер, *6* – одновибратор, *7* – приемный усилитель, *8* – устройство вывода, *9* – элементы управления

Осциллограммы работы прибора представлены на рис 4. Наличие в схеме повышающего преобразователя (ПП) объясняется необходимостью формирования высоковольтного (порядка 150 В) зондирующего импульса. При этом управление силовым ключом ПП также осуществляется микроконтроллером.

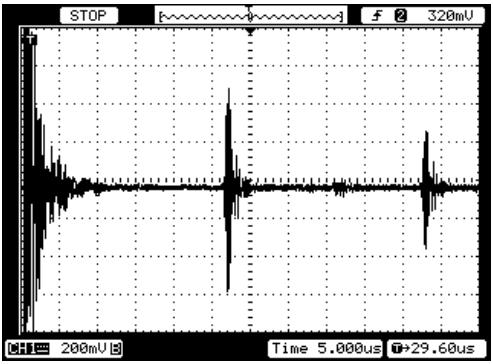


Рис. 4. Эхо-импульсы, полученные на приемном преобразователе

На рис. 5 представлен акустический сигнал, полученный на выходе приемного пьезодатчика.

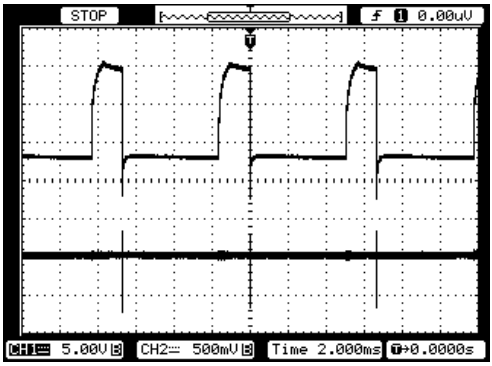


Рис. 5. Временной цикл работы прибора: *1* – работа повышающего преобразователя, *2* – зондирующие импульсы

Выводы

Таким образом, в ходе данной работы показана возможность разработки измерителя скорости ультразвуковых колебаний, функционирующего под управлением микроконтроллера. Данный подход позволяет получать высокие точностные характеристики, эффективно производить обработку результатов (усреденение), а также оперативно изменять параметры и алгоритм рабочего цикла прибора в зависимости от решаемых задач.

Список литературы

1. *Муравьев, В. В*. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки. – Дефектоскопия. – 1989. – № 2. – С. 66–68.

2. Atmel [Электронный ресурс]. – URL: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf/ (дата обращения: 05.11.2017).

3. Программирование Ардуино [Электронный ресурс] // Arduino.ru. – URL: http://arduino.ru/Reference/ (дата обращения: 05.11.2017).

D. V. Zlobin, CSc in engineering, associate professor
V. F. Nuriev, student
L. V. Gushchina, postgraduate student
E-mail: kafedra@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

A Device for Measuring the Acoustical Waves Velocity

The article describes approaches to the development of a device for measuring the propagation velocity of acoustic waves by a pulsed method under the control of a microcontroller.

Keywords: ultrasound, speed of acoustic waves, microcontroller, structuroscopy.

УДК 620.179.161

В. А. Зорин, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование влияния структуры поверхности прутков после термической обработки на скорость рэлеевской волны

В статье показана возможность оценки структуры поверхностного и подповерхностного слоя прутка после термической обработки по скорости рэлеевской волны с помощью ультразвукового метода многократной тени и использования бесконтактного электромагнитно-акустического преобразователя.

Ключевые слова: скорость рэлеевских волн, электромагнитно-акустическое преобразование, термообработка.

В существующем многообразии задач, решаемых методами неразрушающего контроля, важная роль отводится структуроскопии. В отличие от дефектоскопии, которая связана с выявлением и оценкой параметров уже существующих дефектов в материалах и изделиях, структуроскопия занимается оценкой структурных и физико-механи-

© Зорин В. А., 2018
Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

ческих характеристик материалов и выявлением таких их изменений, которые предшествуют возникновению дефектов, то есть позволяет прогнозировать преддефектные состояния [1].

В работе использовался метод «многократной тени». Этот способ ультразвуковой дефектоскопии имеет ряд преимуществ для контроля представленных объектов перед традиционным эхометодом, его достоинством является: отсутствие «мертвой зоны», благодаря многократному прохождению обладает высокой чувствительностью, особенность конструкции преобразователя позволяет проводить контроль по цилиндрической поверхности. Рэлеевская волна возбуждается ЭМА-методом, что позволяет устранить влияние качества контакта на результат измерений [2–4].

Для возбуждения и регистрации ультразвуковых сигналов использовался структуроскоп СЭМА [5] в комплекте с ЭМА-преобразователем, который запускает и принимает импульсы рэлеевских волн, распространяющихся по периметру цилиндрической поверхности прутков. Фото экспериментальной установки представлено на рис. 1 [6–7].

Проводилось исследование влияния структуры поверхности прутков, полученных после различных режимов термической обработки, на скорости рэлеевских волн. Проводился отжиг при 850 °С с различной длительностью (30 минут, 60 минут, 120 минут).

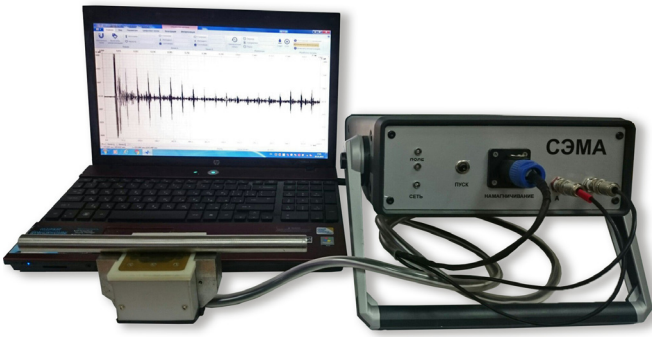


Рис. 1. Фото установки контроля

В табл. 1 представлен химический состав образцов.

Таблица 1. **Химический состав образцов**

№ обр.	№ 1 08Х15Н5Д2Т	№ 2 08Х14Н7МЛ	№ 3 60С2ХФА	№ 4 60С2
C	0,034	0,023	0,658	0,654
Si	0,586	0,366	1,6	1,643
Mn	0,356	0,416	0,463	0,631
P	0,026	0,009	0,021	0,006
S	0,012	0,017	0,019	0,007
Cr	16,18	14,61	1,002	0,038
Mo	0,028	0,048	0,012	0,003
Ni	4,179	6,262	0,242	0,029
Al	0,012	0,011	0,024	0,006
Co	0,03	0,039	0,015	0,007
Cu	1,94	0,0861	0,115	0,04
Nb	0,171	0,002	0,003	0,003
Ti	0,007	0,0037	0,005	0,004
V	0,02	0,016	0,105	0,005

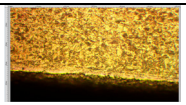
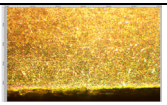
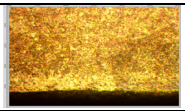
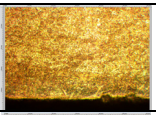
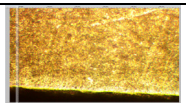
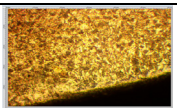
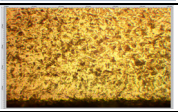
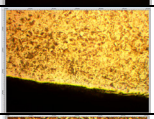
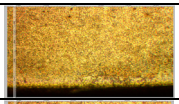
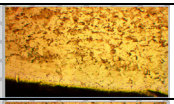
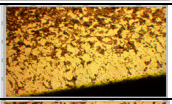
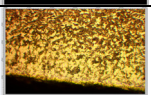
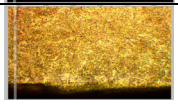
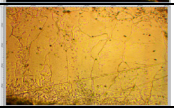
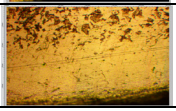
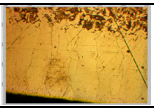
Описание структуры прутков до термообработки: 1 – мартенсит+аустенит, 2 – реечный мартенсит, 3 – перлит, 4 –перлит + ферритная сетка. Были сделаны фотоснимки всех объектов контроля. Так как прутки № 3 и № 4 являются углеродистыми, в результате отжига на поверхности образцов образовался обезуглероженный слой. В табл. 2 представлены фотографии микроструктуры объектов контроля, полученных после отжига.

В результате проведенных измерений были получены серии эхоимпульсов, многократно прошедших по периметру контрольных образцов и образцов после отжига. По формуле (1) рассчитывалась скорость рэлеевской волны в контрольном образце. Осциллограмма ультразвукого сигнала для контрольного образца представлена на рис. 2 [8–12].

$$C_{Rн} = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot k}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $\Delta t = \frac{t_{p+2} - t_p}{2}$ – разница во времени *p*-го и p+2-импульса рэлеевской волны (рис. 2).

Таблица 2. **Микроструктура объектов контроля**

№ обр.	Контр. образцы	30 минут	60 минут	120 минут
1				
2				
3				
4				

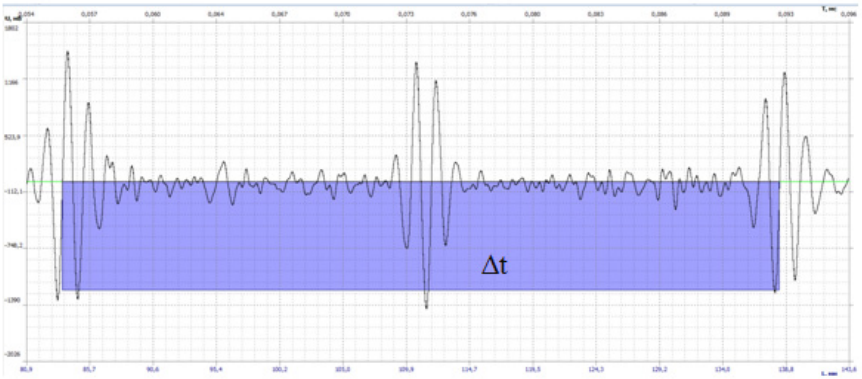


Рис. 2. Ультразвуковые импульсы, прошедшие по периметру контрольного образца

Скорость рэлеевских волн для образцов после термообработки рассчитывалась по отставанию рэлеевской волны относительно контрольного образца (рис. 3).



Рис. 3. Разница во временах распространения *n*-го импульса между отожженным и контрольным образцом

Разность скоростей рассчитывалась по формуле (2).

$$C_R = \frac{\pi\left(d_0 - \Delta d\right)m}{\Delta t_n}, \qquad (2)$$

где $\Delta t_n = t_n - t_{0n}$ – разница во временах распространения *n*-го импульса рэлеевской волны при термообработке и при ее отсутствии (рис. 3).

Полученные скорости свели в табл. 3.

Таблица 3. **Скорости рэлеевских волн**

№	Контр. образцы	30 минут	60 минут	120 минут
1	2985±1	2965±1	2945±1	2957±1
2	2929±1	2927±1	2926±1	2928±1
3	3043±1	3042±1	3042±1	3040±1
4	3021±1	2992±1	3019±1	3016±1

В ходе работы были измерены твердость образцов и глубина обезуглероженного слоя. Результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4. **Твердость объектов контроля и глубина обезуглероженного слоя**

№	Контр. образцы		30 минут		60 минут		120 минут	
	Твердость, НВ	Глубина слоя, мкм	Твердость, НВ	Глубина слоя, мкм	Твердость, НВ	Глубина слоя, мкм	Твердость, НВ	Глубина слоя, мкм
1	384	–	281	–	283	–	280	–
2	297	–	261	–	264	–	258	–
3	253	0	214	22	228	25	220	13
4	180	0	139	47	191	46	155	40

В результате проведенной работы получены следующие выводы:

– максимальная скорость рэлеевской волны наблюдается в контрольном образце № 3 – перлит без обезуглероженного слоя;

– минимальная скорость наблюдается в образце номер 2 после одного часа термообработки – реечный мартенсит;

– минимальное изменение скорости наблюдается в образце номер 2, который состоит из реечного мартенсита;

– максимальное изменение скорости наблюдается в образцах номер 1 и 4, в образце номер 1 при отжиге происходит преобразование мартенсита + аустенита в ферритно-перлитную смесь, что подтверждается значительным снижением твердости, это в свою очередь влияет на распространение рэлеевской волны, в образце 4 при термообработке возникает обезуглероженный слой, из-за которого снижается скорость рэлеевской волны.

Список литературы

1. *Ермолов, И. Н.* Неразрушающий контроль : Кн. 2 : Акустические методы контроля / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, В. В. Сухоруков. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

2. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

3. *Сучков, Г. М.* Повышение возможностей бесконтактной дефектоскопии поверхности катанных ферромагнитных металлоизделий / Г. М. Сучков, О. Н. Петрищев, С. В. Хащина, А. В. Десятниченко, Е. Л. Ноздрачева // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 4. – С. 31–35.

4. *Толипов, Х. Б.* Экспериментальная установка для бесконтактного измерения скорости и амплитуды смещений волны Рэлея с малого участка поверхности // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 1. – С. 175.

5. *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.

6. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

7. Possibilities of the mirror through transmission electromagnetic-acoustic technique on multiple reflections / K. V. Petrov, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova, V. A. Zorin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881, no. 1. – P. 012018.

8. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // Автометрия. – 2016. – Т. 52, №. 4. – С. 62–70.

9. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник Ижевского государственного технического университета имени Т. Т. Калашникова. – 2016. – № 3. – С. 46–50.

10. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683, no. 1. – P. 020156.

11. *Муравьева, О. В.* Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркальнотеневым методом многократных отражений / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 12. – С. 11–19.

12. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 17–23.

V. A. Zorin, postgraduate student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Investigation of the Influence of the Surface Structure of Rods after Thermal Treatment on the Velocity of the Rayleigh Wave

The article shows the possibility of estimating the structure of the surface and subsurface layer of a rod after thermal processing by the velocity of a Rayleigh wave using the multiple shadow ultrasonic method and noncontact electromagnetic-acoustic transducer.

Keywords: speed of role waves, electromagnetic-acoustic transformation, heat treatment.

УДК 004.432.2

А. И. Кириллов, мл. науч. сотрудник
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
А. В. Матросов, *М. П. Кожевников*, *Т. Е. Шелковникова*, магистранты
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
E-mail: pattl7@mail.ru

Программное обеспечение электрометрического комплекса для диагностики твердых тканей зуба

В статье рассмотрены принципы взаимодействия электрометрической информационно-измерительной системы с разработанным программным обеспечением. Приведена его структура, изложены методы обмена данными между сервером базы данных и устройствами с операционными системами Windows и Android.

Ключевые слова: электрометрия, твердые ткани зуба, программное обеспечение, база данных, web-интерфейс, кроссплатформенность.

Введение

В настоящее время существует множество методов диагностики твердых тканей зуба, таких как рентгеноскопия, лазерная и ультразвуковая диагностики [1]. Электрометрический метод анализа занимает

© Кириллов А. И., Матросов А. В., Кожевников М. П., Шелковникова Т. Е.

среди них значимое место ввиду своей дешевизны, достаточно высокой точности, не оказывая при этом негативного влияния на организм человека. Введение нового способа измерения электропроводности твердых тканей зуба в разработанном электрометрическом комплексе с каналом измерения напряжения позволяет значительно повысить точность постановки диагноза пациенту [2]. В связи с этим необходимо выполнить клинические исследования со сбором статистики для калибровки диагноза кариозного процесса и измеренных данных в автоматизированном режиме.

Поскольку разработанный аппарат «ЭДЗ-1» [2] изначально выполняет только измерительные операции, актуальной задачей является разработка программного обеспечения, выполняющего сбор, хранение и обработку данных. Это значительно расширит функциональные возможности разработанного комплекса и позволит, например, врачу осуществлять прогноз кариозного процесса и назначать оптимальную дату приема пациентов. Для этого целесообразно использовать персональный компьютер (ПК), поскольку вычислительные мощности современных ПК позволяют достаточно быстро обрабатывать большие массивы информации, а также работать с базами данных (БД). Также для удобства применения такой системы нужно предусмотреть возможность использования современных мобильных устройств ввиду их широкого распространения. Это позволит, в случае необходимости, работать с БД без наличия ПК. Анализ показал, что наибольшую популярность среди таких устройств имеют смартфоны и планшеты на базе операционной системы (ОС) Android [3], поэтому было принято решение разрабатывать ПО именно под такие устройства.

Разработка программного обеспечения для электрометрической информационно-измерительной системы

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного электрометрического комплекса, состоящая из электрометрической информационно-измерительной системы (ЭИИС) и программного обеспечения.

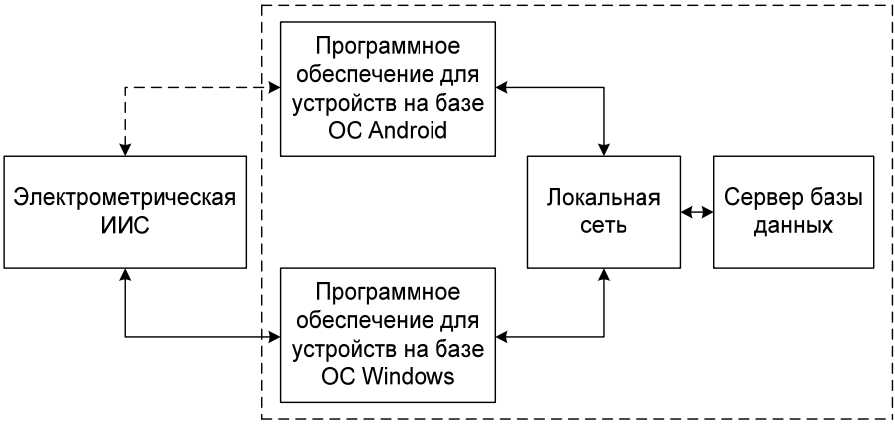


Рис. 1. Структурная схема электрометрического комплекса

Взаимодействие программного обеспечения и электрометрической ИИС осуществляется следующим образом. На начальном этапе производятся измерения с применением ЭИИС и полученные данные подвергаются первичной обработке в микропроцессоре и сохраняются в энергонезависимой памяти. На следующем этапе по запросу оператора производится считывание информации из ЭИИС в ПК с ОС Windows. Затем данные сохраняются на удаленной машине (сервере) в БД. В случае необходимости по требованию оператора выполняется считывание информации, ее редактирование или удаление. На этом этапе также производится статистический анализ полученных данных. В качестве дополнительного канала связи ЭИИС с БД можно использовать мобильное устройство, например, смартфон на базе ОС Android. Рассмотрим более подробно состав программного обеспечения. На рис. 2 изображена его структурная схема, при этом каждый из трех основных блоков ПО является отдельной программой.

Блок получения измерительной информации обеспечивает передачу сохраненных данных из ИИС в БД. Предусмотрена возможность ввода дополнительной информации о пациенте: возраст, пол и т. д. Это позволяет выполнять статистическую обработку данных по определенным группам пациентов. В качестве сервера используется компьютер, подключенный к местной локальной сети. Это позволяет одновременно работать с единой БД, например, при выгрузке измери-

тельной информации на разных компьютерах. Модуль *PHP* организовывает отображение запроса из БД в web-интерфейс и впоследствии результат запроса отображается в приложении Android. В этот блок также входит модуль статистической обработки, который работает по запросу от блока обработки измерительной информации. Это позволяет осуществлять клинические исследования и прогноз кариозного процесса для конкретного зуба.

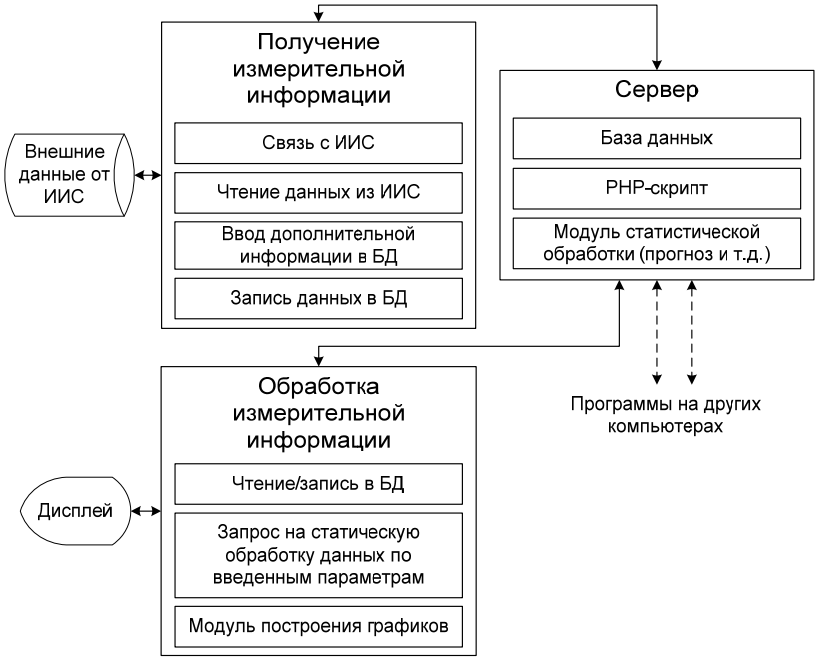


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения электрометрической ИИС

Ввиду того, что вся информация хранится на локальном сервере, доступ к таким данным можно получить практически с любого устройства, поддерживающего необходимые сетевые интерфейсы (такие как Ethernet или Wi-Fi). Для обеспечения повышенной надежности на сервере установлено программное обеспечение, которое выполняет функцию резервного копирования БД. При этом обновление происходит в назначенное время. Такой подход позволяет восстановить БД из резервной копии в случае повреждения основного файла БД. Для об-

работки и вывода данных используется блок обработки измерительной информации. В нем осуществляется обработка полученных данных и графическое представление результатов. Для этого в интерфейсе программы предусмотрены поля ввода ограничений: по возрасту, полу, электропроводности и т. д.

Мобильное приложение для электрометрической ИИС

В разработанном электрометрическом комплексе имеется возможность подключения к базе данных мобильных устройств под управлением ОС Android. Ввиду особенностей ОС доступ к базе устройство получает не через драйвер (как в случае с ОС Windows), а через дополнительный интерфейс (скрипт). Этот скрипт написан на языке PHP, что позволяет отображать информацию не только на устройствах с ОС Android, но также на устройствах с другими ОС. Это связано с тем, что язык PHP является кроссплатформенным и имеет драйвер доступа к СУБД MySQL [4]. На рис. 3 показана схема доступа Android-приложения к БД.

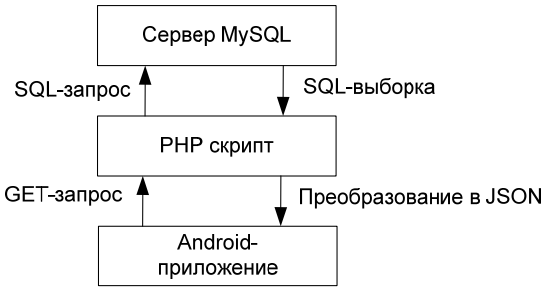


Рис. 3. Обработка запроса для Android-приложения

Рассмотрим взаимодействие между Android-приложением и сервером с СУБД MySQL подробнее [5]. После запуска приложения на устройстве пользователь вводит информацию для поиска в БД. Введенная пользователем информация передается в виде GET-запроса (используя функцию URL.Get) в PHP-скрипт. При этом в качестве запроса передается строка следующего вида:

$$http://"адрес\_сервера"/"скрипт".php/$$
$$/?"критерии\_поиска"="запрос\_на\_поиск"$$

После этого PHP-скрипт соединяется с БД и передает в нее SQL-запрос. На следующем этапе происходит генерация SQL-выборки и

пересылка ее в PHP-скрипт. Затем PHP-скрипт, используя метод *json_encode*(), конвертирует полученные данные в JSON-массив и пересылает его в приложение. В приложении осуществляется парсинг (синтаксический разбор) JSON-массива и вывод результата на дисплей.

Заключение

Таким образом, разработанное программное обеспечение значительно расширяет функциональные возможности электрометрической информационно-измерительной системы для диагностики твердых тканей зуба. Оно позволяет эффективно обрабатывать данные, поступающие с электрометрической ИИС, выполнять прогноз кариозного состояния зубов, выводить результаты в числовой и графической форме, а также имеет удобный интерфейс и возможность подключения и использования мобильных устройств.

Список литературы

1. *Горячев, Н. А.* Современные методы диагностики заболеваний твердых тканей зубов : учеб.-метод. пособие для студентов / Казан. гос. мед. ун-т. – Казань : Медицина, 2012. – 56 с.

2. *Кириллов, А. И.* Анализ метрологических характеристик электродиагностических аппаратов для диагностики твердых тканей зубов / А. И. Кириллов, Е. Ю. Шелковников, С. Р. Кизнерцев // Ползуновский альманах. – 2015. – № 1. – С. 111–114.

3. Рейтинг операционных систем: июнь 2017 [Электронный ресурс] // ITrew.ru: Сайт об IT для пользователей и энтузиастов. – URL: http://www.itrew.ru/windows/reyting-operacionnykh-sistem-iyun-2017.html (дата обращения: 21.11.2017).

4. Подключение к MySQL при помощи Android API, json’a и PHP [Электронный ресурс] // СоХабр. – URL: https://sohabr.net/habr/post/241207/ (дата обращения: 21.11.2017).

5. FireDAC.MySQL Sample [Электронный ресурс] // Embarcadero. – URL: http://docwiki.embarcadero.com/CodeExamples/Tokyo/en/FireDAC.MySQL_Sample (дата обращения: 21.11.2017).

A. I. Kirillov, junior researcher
A. V. Matrosov, magister student
M. P. Kozhevnikov, magister student
T. E. Shelkovnikova, magister student
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Software of Electrometric Complex for Diagnostics of Hard Tooth Tissues

In the article the principles of interaction of the electrometric information-measuring system with the developed software are considered. Its structure is described, methods of data exchange between a database server and devices with Windows and Android operating systems are stated.

Keywords: electrometry, hard tooth tissues, software, database, web-interface, cross-platform.

УДК 612.143

Я. А. Копысов, магистрант
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Особенности метода определения артериального давления по Н. Н. Савицкому при декомпрессии манжеты

Показано, что признаки определения артериального давления по Н. Н. Савицкому присутствуют как при компрессии, так и при декомпрессии манжеты. Если в первом случае они определяются визуально, то во втором – автоматически или полуавтоматически, используя некоторые особенности.

Ключевые слова: артериальное давление, волновые формы, тахоосциллография, тахоосцилляции.

Введение

В 1934 году Н. Н. Савицким начата разработка нового неинвазивного тахоосциллографического метода определения артериального давле-

© Копысов Я. А., 2018

ния (АД) в магистральных артериальных сосудах конечности. Метод требует линейного подъема давления в пережимной манжете со скоростью 3–5 мм рт. ст. Получаемая в результате тахоосциллограмма расшифровывается визуально оператором. В результате дешифрирования с погрешностью ±(2-3) мм рт. ст. [2, с. 171] измеряется минимальное или диастолическое давление Мн, среднее динамическое Ср, боковое систолическое Бс и максимальное систолическое Кс. Это позволяет определить величину гемодинамического удара Кс-Бс и пульсового давления Бс-Мн, имеющих большое значение в клинической практике. Метод Н. Н. Савицкого, как и инвазивный (прямой метод), применяется для исследовательских целей. Инвазивный метод уступает тахоосциллометрическому, т. к. не позволяет определять боковое систолическое давление Бс, как и все другие косвенные методы.

Метод Н. Н. Савицкого хорошо изучен и работает только при компрессии манжеты. Поэтому возникает вопрос о возможности использования признаков определения значений Кс, Бс, Ср и Мн, сформулированных Н. Н. Савицким, не при компрессии, а при декомпрессии манжеты для автоматического или полуавтоматического определения АД. Ответ на данный вопрос в литературе не обнаружен.

Вопрос разработки подобного полуавтоматического или автоматического прибора является актуальным, т. к. в настоящее время, по заключению специалистов Российского кардиологического научно-производственного комплекса МЗ РФ (отделы артериальных гипертоний и новых методов диагностики и исследований):

- ни один прибор не определит АД при движениях пациента [1, с. 10]. Так, прибор SL90202 (производства SpaceLabs) не обеспечивал измерения АД при велоэргометрической пробе в 82 % случаях [1, с. 6];
- чрезвычайно затруднено как врачебное, так и приборное определение АД при выраженных нарушениях ритма [1, с. 6];
- при устойчивых отличиях приборного и экспертного значений АД врачам рекомендуется использовать прибор с другим алгоритмом определения АД [1, с. 10], т. е. рекомендуется подбирать прибор под пациента.

В качестве экспертного метода авторы используют общепризнанный метод Короткова, который измеряет только значения Мн и Кс.

Анализируя визуально волновые формы тахоосцилляций, Н. Н. Савицкий установил, что они все разделяются на тахоосцилляции постдикротического и преддикротического типа. Савицкий отмечает, что анализ и чтение тахоосцилляций постдикротического типа проще. Возникает вопрос о возможности подобного разделения тахоосцилляций и простоты определения АД при декомпрессии манжеты.

При использовании метода Н. Н. Савицкого минимальное диастолическое Мн определяется по моменту появления на диастолическом отрезке кривой небольшого отрицательного колебания, а конечное систолическое давление Кс определяется в момент исчезновения пульса. Ожидается, что при декомпрессии для определения значений Мн и Кс, возможно, потребуется искать дополнительные или новые признаки, поскольку, например, определение Кс в момент исчезновения пульса (по Н. Н. Савицкому) требует применения дополнительного датчика. Заметим, что при декомпрессии Кс должно определяться на момент появления пульса, а не на момент его исчезновения.

Н. Н. Савицкий в своих монографиях уделяет большое внимание качеству дифференцирования объемного сигнала [2, 3]. Автор отмечает, что при низком качестве дифференцирования исчезают признаки, по которым определяются значения АД [2, с. 152–153]. Дополнительно автор утверждает, что эти признаки во многом зависят от скорости изменения давления в манжете. Это тоже необходимо учитывать при разработке прибора неинвазивного определения артериального давления.

Признаки определения артериального давления по Н. Н. Савицкому при компрессии манжеты

Наиболее тонким индикатором, характеризующим изменения условий движения крови в артерии, оказывается нижний отрезок дифференциальной кривой [3, с. 152].

Дифференциальная осциллограмма является тонким индикатором, дающим возможность косвенным путем определить давление крови у человека. По нижнему отрезку дифференциальной кривой определяются: принадлежность сигнала к преддикротическому или постдикротическому типу; минимальное Мн, среднее Ср, боковое Бс и конечное систолическое артериальное давление Кс.

Признаки определения минимального артериального давления Мн:

- появление отрицательного колебания диастолического отрезка в его начале, для тахоосциллограммы преддикротического типа, или в его конце, для тахоосциллограммы постдикротического типа;
- уход диастолического отрезка за нулевую линию;
- положительные амплитуды тахоосциллограммы начинают нарастать.

Признаки определения среднего артериального давления Ср:

- на уровне нулевого положения манометра появляется узловое утолщение, так называемый узел «закрытия» кровеносного сосуда;
- далее положительные тахоосцилляции часто достигают максимальной величины.

Признаки определения бокового или истинного систолического артериального давления Бс:

- положительные осцилляции одинаковы или сразу уменьшаются;
- утолщение растягивается в прямую, почти горизонтально;
- отрицательные колебания становятся все больше. Они ложатся сначала в середине диастолического периода. Затем положительная осцилляция почти непосредственно начинает переходить в отрицательную;
- амплитуда положительных осцилляций, по мере увеличения отрицательных, уменьшается. Величина отрицательных осцилляций достигает некого максимума, затем начинает уменьшаться;
- максимальное отрицательное колебание соответствует Бс.

Признаки определения максимального или систолического артериального давления Кс:

- исчезает сигнал пульса при повышении давления в манжете.

На рис. 1 представлена тахоосциллограмма из книги Н. Н. Савицкого, где наглядно показаны все признаки нахождения АД.

На рис. 1 Мн находится в момент появления отрицательного колебания в конце диастолического отрезка. Давление Ср определяется в момент появления узла «закрытия». Бс находится в точке максимального отрицательного колебания. Все перечисленные виды давления выделены кругом и отмечены стрелкой на шкале давления.

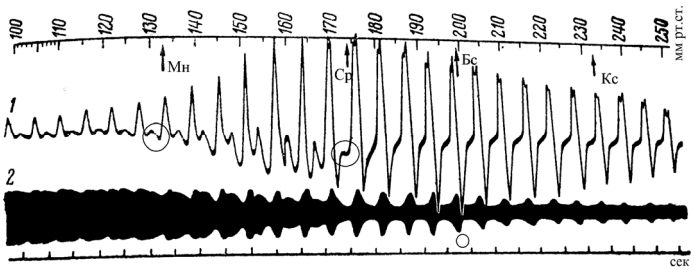


Рис. 1. Тахоосциллограмма постдикротического типа с одновременной записью изменений конфигурации тени сосуда: *1* – дифференциальная кривая тахоосциллограммы; *2* – тень сосуда.

Признаки определения АД по предлагаемому методу

В отличие от метода Н. Н. Савицкого, наличие данных признаков на тахоосциллограмме необходимо определить не при компрессии манжеты, а при ее декомпрессии.

Пример измерительного файла, полученный при декомпрессии манжеты, приведен на рис. 2.

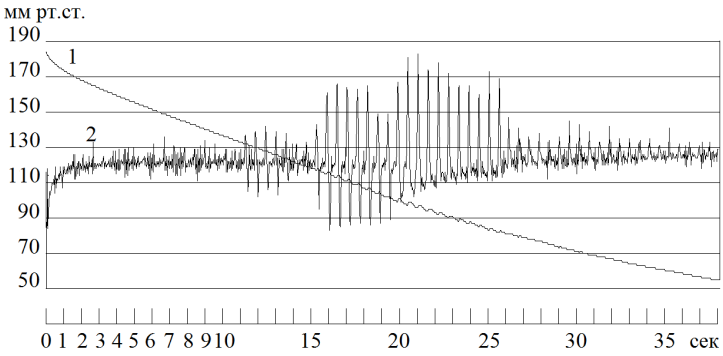


Рис. 2. Отображение исходного измерительного файла
1 – график спада давления в манжете; *2* – график тахоосцилляций

Из рис. 2 следует, что на волновые формы тахоосцилляций наложены шумы, которые необходимо уменьшить или исключить, т. к. они затрудняют нахождение признаков определения всех типов давления (Кс, Бс, Ср и Мн).

Оптимальный фильтр в нашем случае должен не искажать исходный сигнал, убирая помехи. Используя фильтры нижних частот раз-

личных типов и изменяя их характеристики, было установлено, что при частоте среза 3 Гц и ниже исчезают практически все признаки. При частоте среза 4 и 5 Гц на тахоосцилляциях отображаются все признаки, необходимые для определения всех типов АД. Дальнейшее повышение величины частоты среза приводит к увеличению искажений.

Из использованных фильтров предпочтение отдано фильтру Баттерворта с частотой среза 5 Гц, построенному по 11 точкам.

Для упрощения анализа тахоосциллограммы необходимо знать, где начинается каждый систолический подъем. Для этого на дифференцированный исходный сигнал были нанесены вертикальные линии осцилляций.

Начало каждой осцилляции определяется по моменту перехода отрицательных значений дифференцированного сигнала в положительные.

Результат обработки исходного сигнала фильтром Баттерворта с нанесенными вертикальными линиями, выделяющими осцилляции, представлен на рис. 3.

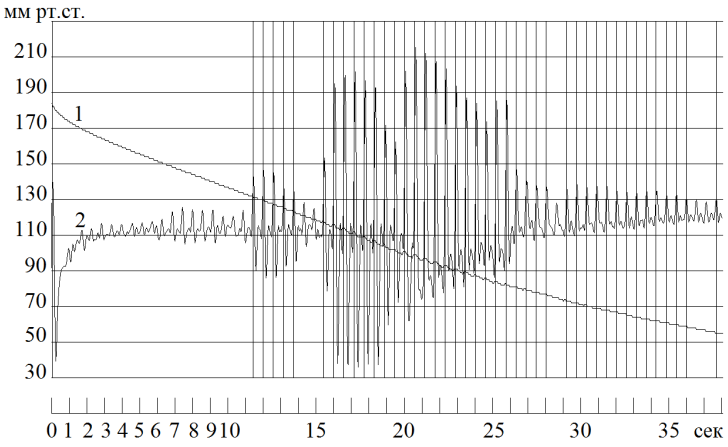


Рис. 3. Результат обработки сигнала фильтром Баттерворта 11-го порядка для частоты 30 Гц, с частотой среза 5 Гц, построенным по 11 точка, с нанесёнными вертикальными линиями, выделяющими осцилляции: *1* – график спада давления в манжете; *2* – график тахоосцилляций

При декомпрессии манжеты разбиение тахоосциллограммы на осцилляции упрощает процесс определения принадлежности сигнала к постдикротическому или преддикротическому типу.

При преддикротической форме сигнала наиболее глубоким западением становится преддикротическое западение, достигающее максимальной величины, соответствующее боковому систолическому давлению Бс. Это преддикротическое западение присутствует на всем протяжении тахоосциллографического сигнала. Расстояние между осцилляциями и вершинами западений практически сохраняется также на всем протяжении сигнала.

При постдикротическом типе сигнала формирование отрицательной части волны при снижении давления в манжете идет за счет углубления в начале предзападения, которое вблизи среднего динамического давления Ср постепенно переходит в постзападение. Расстояния между осцилляциями и вершинами западений изменяются. При этом вершины этих западений перемещаются от диастолического фронта сигнала к систолическому его подъему.

Сохранение расстояний в случае преддикротического типа сигнала и их изменение для постдикротического типа необходимо использовать в дальнейшем при разработке алгоритма нахождения АД при определении типа файлов (пред- или пост-типа).

Данный подход разделения на пред- и постдикротические типы файлов был опробован на 62 реальных измерительных файлах, в результате чего получилось 37 файлов преддикротического типа и 27 файлов – постдикротического типа.

В реальных измерительных файлах присутствуют признаки определения Бс, Ср и Мн. Нахождение данных признаков проиллюстрировано на рис. 4.

Отметим, что нахождение Мн по Н. Н. Савицкому при компрессии предполагает обнаружение появления первого отрицательного зубчика, в нашем случае (при декомпрессии) последнего, перед началом следующего систолического подъема кривой. Так как «эти изменения иногда выражены не очень отчетливо» [3, с. 147], то определение Мн затруднительно. Поэтому предлагаемый метод предполагает нахождение давления Мн по методике, использующей метод Н. С. Короткова как эталон при отработке данной методики. Аналогично предлагается находить и давление Кс, т. к. предлагаемый метод не использует дополнительный датчик пульсовой волны (используемый в методе Н. Н. Савицкого) для определения Кс.

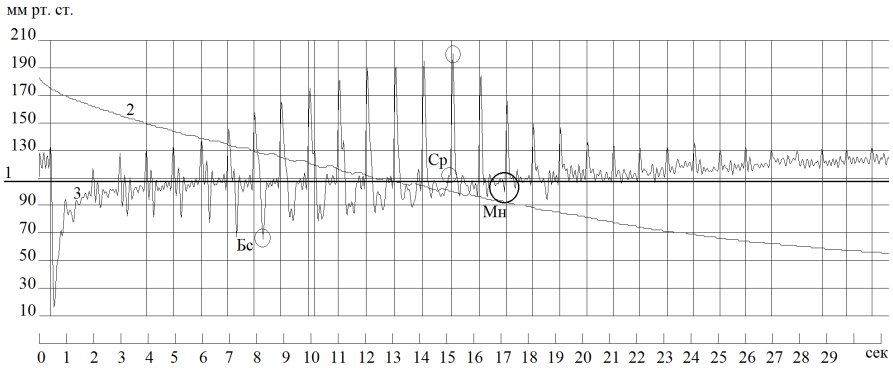


Рис. 4. Нахождение Бс, Ср и Мн на тахоосциллограмме в случае декомпрессии манжеты: *1* – нулевая линия; *2* – график спада давления в манжете; *3* – график тахоосцилляций

Выводы

1. В случае декомпрессии манжеты (так же как и при компрессии) существует две формы тахоосциллограмм, которые свойственны человеку, а именно: тахоосциллограммы преддикротического и постдикротического типов. При компрессии в постдикротическом типе сигнала сначала идет постзападение, затем предзападение. При декомпрессии манжеты наоборот, в начале идёт предзападение, затем постзападение.

2. Особенности изменения расстояния между вершинами западений и осцилляциями, в случае файла преддикротического типа, эта величина практически постоянна, постдикротического типа – переменна, что облегчает определение типа файла при разработке алгоритма определения АД по предлагаемому методу.

3. Для определения давлений Бс и Ср необходимо использовать признаки, предложенные Н. Н. Савицким.

4. Для нахождения давлений Кс и Мн необходимо разработать новую методику, использующую метод Н. С. Короткова как эталон при ее отработке.

5. Для уменьшения шумов в тахоосциллографическом сигнале необходимо использовать фильтр нижних частот с частотой среза 4–5 Гц.

Список литературы

1. Суточное мониторирование артериального давления при гипертонии (Методические вопросы) / А. Н. Рогоза, В. П. Никольский, Е. В. Ощепкова, О. Н. Епифанова, Н. К. Рунихина, В. В. Дмитриев ; под ред. Г. Г. Арабидзе, О. Ю. Атькова. – М. : Российский кардиологический научно-производственный комплекс МЗ РФ, 1997. – 44 с.

2. *Савицкий, Н. Н.* Некоторые методы исследования и функциональной оценки системы кровообращения. – Л. : Медицина, 1956. – 329 с.

3. *Савицкий, Н. Н.* Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики. – Л. : Медицина, 1974. – 311 с.

4. Руководство по внутренним болезням / под ред. П. Е. Лукомского, Н. Н. Савицкого. Т. 1. – М. : Медгиз, 1962. – 686 с.

5. *Эман, А. А*. Биофизические основы измерения артериального давления. – Л. : Медицина. 1983. – 126 с.

6. Способ оценки состояния сердечно-сосудистой системы : пат. 2549665 Рос. Федерация : МПК A61B 5/021 (2006.01) / Гаткин Е. Я. и др. ; заявка № 2014111561/14 ; заявл. 27.03.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

7. СКАД-2 [Электронный ресурс] // КОНСТЭЛ. – URL: http://www.constel.ru/med-tech/skad-2 (дата обращения: 17.11.2017).

Ya. A. Kopysow, magister student
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Features of the Method of Determining Blood Pressure According to N.N. Savitsky During Decompression of the Cuff

It is shown that the signs of determining blood pressure according to N.N. Savitsky is present with both compression and decompression cuffs. If in the first case they are determined visually, then in the second case – automatically or semi-automatically, using some of its features.

Keywords: arterial pressure, wave forms, tachooscillography, tachooscillations.

УДК 57.08 004.931

А. В. Коробейников, канд. техн. наук, доц.
Ю. Б. Камалова, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Применение сверточной нейронной сети LeNet для классификации изображений зерен пыльцы

Описана и применена сверточная нейронная сеть из примера LenetMnistExample фреймворка DeepLearning4j. В ходе экспериментов выбранная базовая топология нейросети LeNet не изменялась, была реализована загрузка изображений зерен пыльцы, изменено количество классов задачи классификации (outputNum) и размер подвыборки обучающей выборки (batchSize). Сформированы обучающая (706 фотографий) и проверочная (174 фотографии) выборки трех классов пыльцевых зерен. Вычисленные по результатам классификации на тестовой выборке метрики качества составили: 1) доля правильных ответов: Accuracy = 0,9655; 2) точность: Precision = = 0,9767; 3) полнота: Recall = 0,9734; 4) мера F1: F1 Score = 0,9749.

Ключевые слова: компьютерный пыльцевой анализ, пыльца растений, распознавание изображений, сверточные нейронные сети.

Компьютерный пыльцевой анализ актуален во многих областях науки и производства – контроль ботанического и географического происхождения меда, в фармацевтической промышленности, в экологии, в палинологии и др.

Палинологические данные находят применение в широком спектре областей, но задачи классификации и подсчета пыльцевых зерен требуют высокой квалификации и трудоемкости. Разработка автоматизированной системы идентификации и классификации пыльцы принесет большую пользу. Предыдущие попытки компьютерной классификации использовали подходы, которые по своей сути были трудными для развития в полностью автоматизированные системы, которые могут работать в значительной степени независимо от оператора.

© Коробейников А. В., Камалова Ю. Б., 2018

Для решения задачи классификации зерен пыльцы был выбран аппарат сверточных нейронных сетей, которые в последние годы успешно применяются для обработки изображений [1–3].

Первой сверточной искусственной нейронной сетью, позаимствовавшей для информатики воплощенные природой в зрительной коре идеи, была искусственная нейронная сеть К. Фукусимы (NeoCognitron, 1975–1980) [4]. Сверточные сети в уже вполне современной форме появились в работах группы Я. ЛеКуна (LeNet, 1989 г.) [4].

Методика проведения эксперимента

В качестве базовой была выбрана топология нейросети из примера LenetMnistExample фреймворка DeepLearning4j [5]. В данном примере решается задача классификации изображений рукописных цифр размером 28×28 и обучающей выборки MNIST [6].

В ходе экспериментов выбранная базовая топология нейросети LeNet не изменялась, однако была реализована загрузка изображений зерен пыльцы, изменено количество классов задачи классификации (outputNum) и размер подвыборки обучающей выборки (batchSize).

Типовой процесс обработки изображения с помощью сверточной нейронной сети LeNet представлен на рис. 1 [7], где схематично показаны карты (матрицы) признаков (Feature maps), получаемые на выходе очередного слоя нейронной сети.

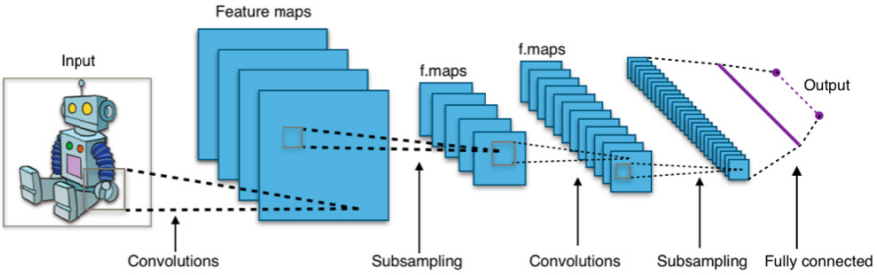


Рис. 1. Процесс обработки изображения сверточной нейронной сетью

В ходе экспериментов использовались следующие параметры слоев нейросети LeNet:

0. Входное изображение: размер 28×28, 1 цветовой слой RGB. Размер исходного многомерного массива составляет 28×28×1.

1. Сверточный слой (Convolutions): размер ядра свертки 3×3, число различных сверток (фильтров признаков) 20, линейная функция акти-

вации (Identity). На выходе слоя получим многомерный массив размером 28×28×20.

2. Слой понижения размерности (Subsampling): размер ядра 2×2. На выходе слоя получим многомерный массив размером 14×14×20.

3. Сверточный слой (Convolutions): размер ядра свертки 5×5, число различных сверток (фильтров признаков) 50, линейная функция активации (Identity). На выходе слоя получим многомерный массив размером 14×14×50.

4. Слой понижения размерности (Subsampling, Pooling): размер ядра 2×2. На выходе слоя получим многомерный массив размером 7×7×50.

5. Полносвязный слой (Fully connected, Dense): число нейронов 500, функция активации ReLU (Rectified Linear Unit). На выходе слоя получим одномерный массив размером 500.

6. Выходной слой (Output): число нейронов (классов) 3, функция активации SoftMax. На выходе слоя получим одномерный массив размером 3.

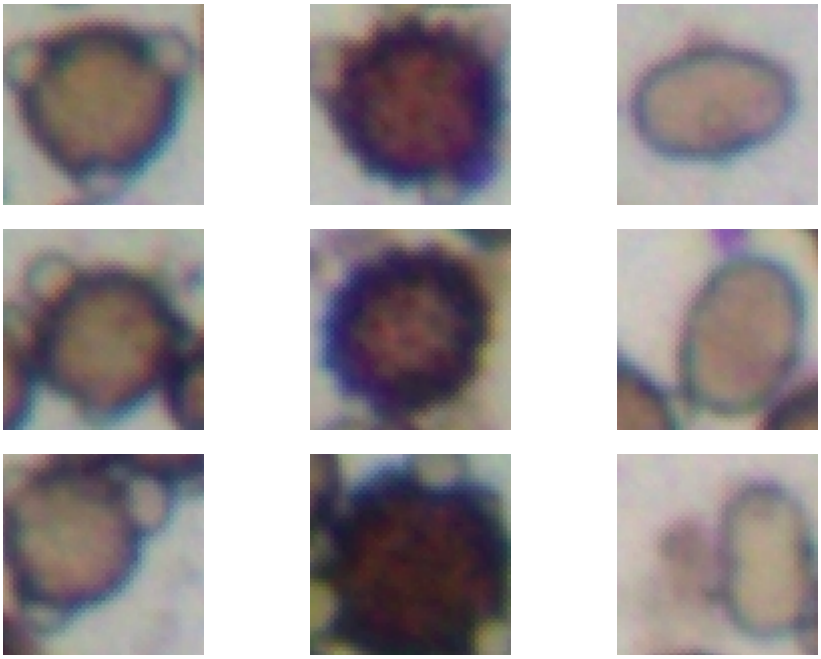
Все изображения были разбиты на обучающую (Training) и тестовую (Testing) выборки, содержащие соответственно 90 и 10 % изображений каждого класса. В табл. 1 представлено количество изображений каждого класса в выборках.

Таблица 1. **Количество изображений в экспериментах**

Выборка	Класс 0	Класс 1	Класс 2	Всего
Обучающая	400	29	277	706
Тестовая	100	7	67	174

В ходе обучения сверточной нейросети использовались следующие параметры: 1) число выходных нейронов: outputNum = 3; 2) размер подвыборки: batchSize = 128; 3) число эпох обучения: epochs = 10; 4) число итераций на каждой эпохе: iterations = 1.

В ходе экспериментов использовалась выборка изображений зерен пыльцы, содержащая три класса зерен: 0) зерна пыльцы гречихи; 1) зерна пыльцы липы; 2) зерна пыльцы подсолнечника. Примеры изображений каждого класса представлены на рис. 2.



а *б* *в*

Рис. 2. Примеры изображений, использованных в экспериментах:
а – класс 0; *б* – класс 1; *в* – класс 2

Результаты экспериментов

В ходе экспериментов были получены результаты классификации на тестовой выборке, представленные в табл. 2.

Таблица 2. **Результаты классификации на тестовой выборке**

Ответ нейросети	Верный ответ		
	класс 0	класс 1	класс 2
класс 0	98	0	4
класс 1	0	7	0
класс 2	2	0	63
Всего	**100**	**7**	**67**

Класс 0. Всего в тестовой выборке 100 образцов из этого класса. Из них нейросеть к классу 0 отнесла 98 образцов и к классу 2 отнесла 2 образца.

Класс 1. Всего в тестовой выборке 7 образцов из этого класса. Из них нейросеть к классу 2 отнесла 7 образцов.

Класс 2. Всего в тестовой выборке 67 образцов из этого класса. Из них нейросеть к классу 2 отнесла 63 образца и к классу 0 отнесла 4 образца.

Вычисленные по результатам классификации на тестовой выборке метрики качества [8] составили: 1) доля правильных ответов: Accuracy= = 0,9655; 2) точность: Precision = 0,9767; 3) полнота: Recall = 0,9734; 4) мера F1: F1 Score = 0,9749.

Выводы

Полученные в ходе экспериментов результаты классификации на тестовой выборке показали применимость и высокую эффективность выбранного аппарата сверточных нейронных сетей для решения задачи классификации зерен пыльцы, что подтверждается высокими значениями метрик качества классификации. В дальнейшем необходимо увеличение выборки по классам пыльцевых зерен, также данная нейронная сеть может быть использована в программе автоматического пыльцевого анализа меда.

Список литературы

1. *Камалова, Ю. Б.* Вычисление статистических параметров в распознавании изображений зёрен пыльцы, полученных с помощью растрового электронного микроскопа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1 (24). – С. 120–123.

2. *Ломаев, Г. В.* Компьютеризированный пыльцевой анализ меда / Г. В. Ломаев, Ю. Б. Камалова // Пчеловодство. – 2014. – № 8. – С. 59–60.

3. *Камалова, Ю. Б.* Методы и подходы в компьютеризированном пыльцевом анализе // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2 (29). – С. 67–71.

4. *Николенко, С.* Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – СПб. : Питер, 2018. – 480 с.

5. Deep Learning for Java [Электронный ресурс]. – URL: DeepLearning4j.org

6. MNIST [Электронный ресурс]. – URL: yann.lecun.com/exdb/mnist/

7. Сверточная нейронная сеть [Электронный ресурс]. – URL: ru.wikipedia.org/wiki/Свёрточная_нейронная_сеть

8. *Соколов, Е.* Семинары по выбору моделей, 2016 [Электронный ресурс]. – URL: github.com/esokolov/ml-course-msu/blob/master/ML15/lecture-notes/Sem05_metrics.pdf

A. V. Korobeinikov, CSc in engineering, assoc. prof.
Yu. B. Kamalova, postgraduate student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Convolutional neural network LeNet for pollen grains classification

The convolutional neural network is described and applied from the example LenetMnistExample of the DeepLearning4j framework. During experiments, the selected basic topology of the LeNet neural network was not changed, the loading of pollen grains images was updated, the number of classes of the classification task (outputNum) and the size of the sampling sub sample (batchSize) were changed. Training (706 photographs) and testing (174 photos) samples of three classes of pollen grains were formed. The quality metrics calculated by the results of the classification on the test sample are: 1) the part of correct answers: Accuracy = 0.9655; 2) Accuracy: Precision = 0.9767; 3) completeness: Recall = 0.9734; 4) measure F1: F1 Score = 0.9749.

Keywords: computer pollen analysis, pollen of plants, image recognition, convolutional neural network.

УДК 620.179.14

В. В. Мирошников, д-р техн. наук, проф.
Н. С. Булыгин, аспирант
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля, ЛНР

Идентификация дефектов при непрерывном контроле протяженных изделий

Произведен расчет вихревых токов в объекте контроля цилиндрической формы, позволяющий в дальнейшем идентифицировать параметры дефекта. Также определению размеров дефекта в реальном масштабе времени в процессе производства протяженных изделий способствует применение набора из трех измерительных катушек, которые расположены на разном удалении от объекта контроля.

Ключевые слова: вихревые токи, объект контроля, обмотка возбуждения, дефект.

© Мирошников В. В., Булыгин Н. С., 2018

Введение

При контроле протяженных изделий (труб, прутков и т. д.) на производстве необходимо знать не только о наличии и месте расположения дефектов, но и их параметры, что позволит классифицировать на устранимые и неустранимые и в дальнейшем сортировать продукцию.

Постановка задачи

Для определения размеров дефекта предлагается использовать набор из трех измерительных катушек, расположенных на разном расстоянии от объекта контроля, каждая из которых позволяет идентифицировать дефект определенного размера. Их расположение показано на рис. 1.

Данный метод базируется на утверждении, что с изменением зазора между объектом контроля и вихретоковым преобразователем изменяется значение полей рассеяния вихревых токов, величина которых также зависит как от амплитуды, так и от частоты поля возбуждения [1].

При скорости прокатки до 2,0 м/с и при частоте возбуждения свыше 500 Гц влиянием скорости движения объекта контроля на величину вихревых токов можно пренебречь. Рассчитаем процессы, протекающие в объекте контроля, с учетом его реальных параметров на стадии проектирования проходного вихретокового преобразователя.

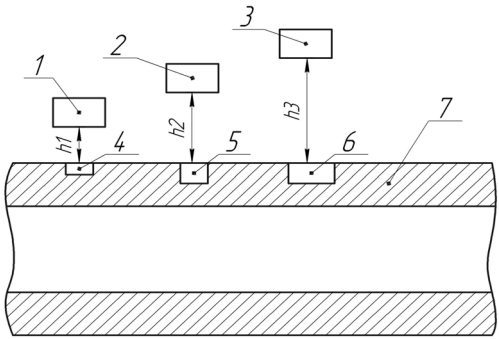


Рис. 1. Схема расположения измерительных катушек датчика относительно объекта контроля: *1*, *2*, *3* – измерительные катушки; *4*, *5*, *6* – минимальные дефекты, детектируемые соответствующими катушками; *h*1, *h*2, *h*3 – расстояния между соответствующими дефектом и катушкой

Решение задачи

Для расчета вихревых токов разобьем цилиндрический объект контроля на N замкнутых контуров, учитывая, что толщина стенки объекта контроля больше глубины проникновения магнитного поля на заданной частоте возбуждения [2]. Зная токи в момент времени I, найдем их новые значения

$$I_k(t+\Delta t) = I_k(t) + (dI_k / dt)\Delta t, \tag{1}$$

решив систему линейных неоднородных уравнений относительно неизвестных dI_k/dt:

$$\sum_{i=1}^{N} M_{ik}(dI_k / dt) + \sum_{j=1}^{n} M_{ojk}(dI / dt) + I_k R_k = 0 \tag{2}$$

где $k = 1...N$, n – число витков в обмотке возбуждения; M_{ik} – коэффициент взаимной индукции между контурами контролируемого объекта с номерами i и k; M_{ojk} – коэффициент взаимной индукции между витком обмотки возбуждения с номером j и контуром экрана с номером k; I_{oj} – ток в обмотке возбуждения; R_k – сопротивление контура.

При нахождении dI_k/dt возникают трудности, связанные с плохой обусловленностью системы (2). Для получения необходимой точности вычислений объекта контроля требуется разбивать на большое ($N \approx 100$) число элементов. При этом коэффициенты уравнения для соседних контуров мало отличаются друг от друга, что приводит к неустойчивости получающихся решений.

Эффективный путь решения данной проблемы заключается в переходе от плохо обусловленной системы дифференциальных уравнений (2) к системе алгебраических уравнений с меньшим числом неизвестных. Для этого воспользуемся методом [3], который заключается в представлении искомой плотности тока в виде многочлена

$$J(x,t) = \sum_{m=1}^{L} F_m(t)(z / b)^m, \tag{3}$$

где L – число коэффициентов $F_m(t)$, подлежащих определению, z – расстояние от центра объекта контроля, b – полудлина объекта контроля, в которой рассчитываются вихревые токи. Тогда

$$I_k(t) \cong J(z_k, t)\Delta z, \tag{4}$$

$$dI_k(t)/dt = \sum_{m=1}^{L} (dF_m(t)/dt)(z_k/b)^m \Delta z. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (2), получим систему N уравнений относительно L неизвестных $dF_m(t)/dt$

$$\sum_{m=1}^{L} (dF_m(t)/dt)\left[\sum_{i=1}^{N} M_{ik}\cdot(z_i/b)^m\right] + \left[\sum_{j=1}^{n} M_{ojk}\cdot dI_{oj}(t)/dt\right]/\Delta z + \\ + R_k \sum_{m=1}^{L} F_m(t)\cdot(z_k/b)^m = 0, \quad (6)$$

Использование метода наименьших квадратов приводит к системе линейных неоднородных уравнений, получающихся из условия равенства нулю производных по всем $dF_m(t)/dt$ (m = 1, L) суммы квадратов (к = 1, N) уравнений (6). Решив ее, находим значения коэффициентов ряда (2) в момент времени $t + \Delta t$.

$$F_m(t+\Delta t) \cong F_m(t) + (dF_m()/dt)\Delta t. \quad (7)$$

Учитывая, что объект контроля располагается симметрично относительно обмотки возбуждения, число уравнений (4) сокращается в два раза, а ряд (3) содержит только нечетные степени, т. е. $m = 2n + 1$.

При вычислении считаем, что максимум величины вихревые токи достигают за 0,25 мс (при частоте тока возбуждения 1 кГц) и выбираем полином (3) пятой степени по нечетным степеням z, т. е. на каждом шаге итерации решалась система трех линейных уравнений с тремя неизвестными, $N = 40$, $\Delta t = 0{,}1$ мкс.

Результаты и их обсуждение

Вычисления для ферромагнитных труб из стали 20 показали, что точность расчетов составляет порядка 5 % для труб диаметром 76 мм (рис. 2) с числом витков обмотки возбуждения 50 при токе возбуждения 3 А.

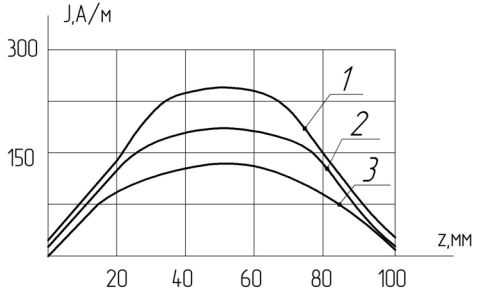


Рис. 2. Распределение вихревых токов в объекте при зазоре:
1 – 3 мм, *2* – 6 мм, *3* – 9 мм

Точность полученных результатов зависит от числа элементов при разбиении объекта контроля и шага дискретизации.

Наличие линейного участка на графике (рис. 2) дает возможность идентифицировать параметры дефекта несколькими вихретоковыми преобразователями, расположенными на расстоянии до 40 мм от объекта контроля.

Выводы

Проведенное иследование показало, что существует реальная возможность создания вихретокового преобразователя, способного определять размеры дефектов в реальном масштабе времени в процессе производства протяженных изделий.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; под ред. В. В. Клюева. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – С. 374.

2. *Дорофеев, А. Л.* Неразрушающие испытания методом вихревых токов. – М. : Оборонгиз, 1961. – 156 с.

3. *Кейлин, В. Е.* Распределение плотности тока в тонких соленоидах с полем заданной конфигурации / В. Е. Кейлин, В. Р. Португальский // Изв. АН СССР. – Энергетика и транспорт. – 1991. – № 2. – С. 77–84.

V. V. Miroshnikov, DSc in engineering, associate professor
N. S. Bulygin, postgraduate student
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Vladimir Dahl Lugansk National University, LPR

Identification of Defects in the Continuous Control of Extended Products

The calculation of eddy currents in the object of control of cylindrical configuration is made, which makes it possible in the future to identify the parameters of the defect. Also, the use of a set of three measuring coils, which are located at a different distance from the object of control, facilitates the determination of the size of the defect in real time in the process of manufacturing extended products.

Keywords: eddy currents, object of control, energizing winding, defect.

УДК 57.089

В. В. Мирошников, д-р техн. наук, проф.
А. В. Лавренченко, ассистент
E-mail: lavchenok@mail.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля, ЛНР

Построение систем электромагнитного контроля концентрации проводящих веществ в организме человека

Приведен численный расчет параметров биологической мембраны, протоплазмы и клетки с учетом сопротивления межклеточного пространства. Полученные результаты позволяют применять их при построении систем электромагнитного контроля для определения концентрации проводящих инородных объектов в организме человека.

Ключевые слова: удельная проводимость, схема замещения, биологический объект, преобразователь, диагностика.

Введение

Актуальной задачей современной диагностики является обнаружение инородных проводящих объектов в теле человека с помощью применения систем электромагнитного контроля. Дальнейшее разви-

© Мирошников В. В., Лавренченко А. В., 2018

тие теории и практики данного вида диагностики связано с усовершенствованием параметров действия, то есть настройки прибора для обнаружения и локализации проводящих включений для конкретной части тела человека.

Постановка и решение задачи

Применение накладного вихретокового преобразователя (ВТП) дает возможность определять местонахождение мелких металлических осколков или частиц в биологическом объекте. Трудность применения данного ВТП заключается в том, что малые геометрические размеры искомых включений при большом зазоре вносят очень малый сигнал. Поэтому важна оптимизация параметров преобразователя, чтобы получить максимальную чувствительность к мелким металлическим осколкам.

ВТП характеризуется обобщенным параметром:

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu\mu_0\sigma}, \qquad (1)$$

где R – радиус катушки возбуждения; ω – круговая частота возбуждения; $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды; σ – удельная электрическая проводимость среды.

Организм человека в магнитном поле диамагнетик, следовательно, электрическая проводимость является влияющим параметром на выходной сигнал преобразователя.

Тело человека по своей структуре неоднородно: кожа, мышцы, кости, внутренние органы, и, соответственно, каждая часть человека имеет разное сопротивление и различную электропроводность.

Электропроводность отдельных участков организма, находящихся между электродами, которые наложены непосредственно на поверхность тела, существенно зависит от сопротивления кожи и подкожных слоев. Внутри организма ток распространяется в основном по кровеносным и лимфатическим сосудам, мышцам, оболочкам нервных стволов.

Ткани организма проводят как постоянный, так и переменный ток. Опыт показывает, что сила тока, которая проходит через биологическую ткань, опережает по фазе приложенное напряжение. То есть емкостное сопротивление тканей больше индуктивного. Из этого следует, что моделировать электрические свойства биологических тканей можно, используя резисторы, которые имеют активное сопротивление, и конденсаторы – носители емкостного сопротивления. Как мо-

дель обычно используют эквивалентную электрическую схему замещения тканей организма. Она представляет собой резистивно-емкостную схему, частотная зависимость (дисперсия) импеданса которой близка к частотной зависимости импеданса биологической ткани.

Из-за разнородности образования биологических тканей и органов построение максимально приближенных эквивалентных схем замещения биологических тканей является сложной задачей, что затрудняет измерения электрического сопротивления живых биологических систем.

Металлические осколки, попадая в биологические ткани человека, находятся в среде, состоящей из клеток тканей, клеточных мембран, протоплазмы и межклеточной жидкости, которые обладают определенными параметрами (сопротивлениями и емкостями). Исходя из этого, для улучшения параметров ВТП целесообразно применять эквивалентные схемы замещения биологических тканей организма человека для расчета сопротивления на клеточном уровне.

Результаты и их обсуждение

Приведен численный расчет параметров мембраны, протоплазмы и клетки с учетом межклеточного пространства.

Согласно модели, предложенной Даусоном и Даниэлли, клеточную мембрану в период интерфазы можно представить в виде, который показан на рис. 1, где h_1 – монослой белка; h_2 – бислой фосфолипидов; h_3 – слой структурированной воды. Тогда толщина мембраны составляет $h_d = 2h_1 + 2h_2 + h_3$.

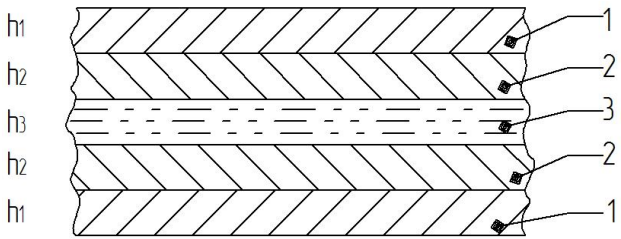


Рис. 1. Структура клеточной мембраны Даусона – Даниэлли

По данным литературных источников [1–5], толщина мембраны может иметь значение от 32 до 130 Å и больше. Это зависит от объема молекул белка и фосфолипидов. В [6] отмечается, что глобулярные

белки имеют размеры (20...100) Å, а толщина фосфолипидного слоя находится в пределах (30...60) Å. Для определенности дальнейшего расчета примем $h_1 = 25$ Å; $h_2 = 35$ Å; $h_3 = 15$ Å. В этом случае толщина мембраны составляет $h_d = 135$ Å.

Известно, что удельная емкость клеточной мембраны равна $C_0 = (0{,}1\ldots0{,}3)$ мкФ/см3. При диаметре клетки $d_c = 18{,}6\cdot10^{-6}$ м плоскость внешней поверхности клетки составляет $Sc = 4\pi r^2 = 1{,}086\cdot10^{-5}$ см^2. Считая, что поверхность клетки равна поверхности мембраны, т. е. $S_c = S_d$, рассчитаем емкость мембраны:

$$C_d = C_0 \cdot S_d = 0{,}11\cdot10^{-6}\cdot1{,}086\cdot10^{-5} = 1{,}195\cdot10^{-12}\ \text{Ф}.$$

Эффективное значение абсолютной диэлектрической проницаемости клеточной мембраны:

$$\varepsilon_{ad} = \frac{h_d B_d}{\rho_d E_d} = \frac{135\cdot10^{-10}\cdot6{,}16\cdot10^{-3}}{23\cdot5{,}41\cdot10^{-3}} = 6{,}68\cdot10^{-10}\ \ \text{Ф/м},$$

где $B_d = 6{,}16$ мТл – магнитная индукция; $E_d = 5{,}41$ мВ/м – напряженность электрического поля, которое создается поясом магнитоскана магнитотерапевтического аппарата «Аврора МК-01» [7]; $\rho_d = 23$ Ом·м – удельное сопротивление мембраны.

Тогда значение относительной диэлектрической проницаемости составит

$$\varepsilon_d = \varepsilon_{ad} / \varepsilon_0 = 75{,}5\,,$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}82\cdot10^{-12}$ Кл/(В·м).

После этого можно рассчитать сопротивление и индуктивность клеточной мембраны:

- электрическое сопротивление клеточной мембраны

$$R_d = \frac{\rho_d \varepsilon_{ad}}{C_d} = \frac{23\cdot6{,}68\cdot10^{-10}}{1{,}195\cdot10^{-12}} = 12857\ \text{Ом};$$

- индуктивность клеточной мембраны

$$L_d = \frac{\mu_{ad} C_d}{\varepsilon_{ad}} = \frac{4\pi\cdot10^{-7}\cdot1{,}195\cdot10^{-12}}{6{,}68\cdot10^{-10}} = 2{,}25\cdot10^{-9}\ \text{Гн}.$$

Учитывая, что радиус протоплазмы составляет около $r_2 = 9{,}286 \cdot 10^{-6}$ м, аналогично рассчитаем ее параметры:

- емкость протоплазмы

$$C_2 = 4\pi\varepsilon_{a2} r_2 = 4\pi \cdot 57{,}5 \cdot 10^{-11} \cdot 9{,}286 \cdot 10^{-6} = 6{,}7 \cdot 10^{-14}\ \Phi;$$

- диэлектрическая проницаемость протоплазмы

$$\varepsilon_{a2} = 65\varepsilon_0 = 57{,}5 \cdot 10^{-11}\ \Phi/\text{м};$$

- сопротивление протоплазмы

$$R_2 = \frac{\rho_2 \varepsilon_{a2}}{C_2} = \frac{3 \cdot 57{,}5 \cdot 10^{-11}}{6{,}7 \cdot 10^{-14}} = 25746\ \text{Ом}.$$

Индуктивность протоплазмы можно рассчитывать двумя методами:

$$L_2 = \frac{\mu_{a2} C_2}{\varepsilon_{a2}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-14}}{57{,}5 \cdot 10^{-11}} = 1{,}463 \cdot 10^{-10}\ \text{Гн}$$

или

$$L_2 = 4\pi\mu_{a2} r_2 = 4\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9{,}286 \cdot 10^{-6} = 1{,}465 \cdot 10^{-10}\ \text{Гн},$$

что дает согласованные результаты.

На основе полученных значений параметров мембраны и протоплазмы рассчитываем параметры клетки:

- емкость клетки (здесь $C_1 = C_d$)

$$C_c = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1{,}195 \cdot 10^{-12} \cdot 6{,}7 \cdot 10^{-14}}{1{,}195 \cdot 10^{-12} + 6{,}7 \cdot 10^{-14}} = 6{,}3 \cdot 10^{-14}\ \Phi;$$

- диэлектрическая проницаемость клетки

$$\varepsilon_{ac} = \frac{C_c}{4\pi r_1} = \frac{6{,}3 \cdot 10^{14}}{4\pi \cdot 9{,}3 \cdot 10^{-6}} = 53{,}9 \cdot 10^{-11}\ \Phi/\text{м};$$

- относительная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ac} / \varepsilon_0 = 60{,}9\ ;$$

- сопротивление клетки

$$R_c = \frac{\rho_c \varepsilon_{ac}}{C_c} = \frac{3 \cdot 53{,}9 \cdot 10^{-11}}{6{,}3 \cdot 10^{-14}} = 25667 \text{ Ом}.$$

Индуктивность клетки можно рассчитать двумя методами:

$$L_c = \frac{\mu_{ac} C_c}{\varepsilon_{ac}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6{,}3 \cdot 10^{-14}}{53{,}9 \cdot 10^{-11}} = 1{,}468 \cdot 10^{-10} \text{ Гн}$$

или

$$L_c = 4\pi\mu_{ac} r_1 = 4\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9{,}3 \cdot 10^{-6} = 1{,}467 \cdot 10^{-10} \text{ Гн},$$

где $\rho_1 = 9{,}3 \cdot 10^{-6}$ м – радиус клетки.

Согласно данным работ [8, 9], ширина межклеточного пространства составляет (100...200) Å. Она заполняется веществом с очень низкой электронной плотностью. Как доказано в [7, 10], каждая клетка окружена шестью соседними клетками. Поэтому для расчета межклеточного сопротивления можно воспользоваться рис. 2. После последовательных преобразований треугольных соединений межклеточных сопротивлений (рис. 2, *а*) соединения типа «звезда» (рис. 2, *б*) получено

$$R_{1c\_com} = 0{,}765 R_{1c} = R_3 = 0{,}765 \cdot 25746 = 19{,}7 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

где $R_{1c} = 25746$ Ом – сопротивление между двумя клетками. При этом на рис. 2 обозначено $R_{1c} = R_1' = R_2'$.

Расчет межклеточной емкости связан со значительными трудностями, т. к. ширина межклеточной щели в несколько раз меньше диаметра клетки $d_1 = 2r_1$.

Выводы

Полученные результаты расчета сопротивления биологических тканей на клеточном уровне позволяют применять их для построения систем электромагнитного контроля при определении концентрации проводящих включений в организме человека.

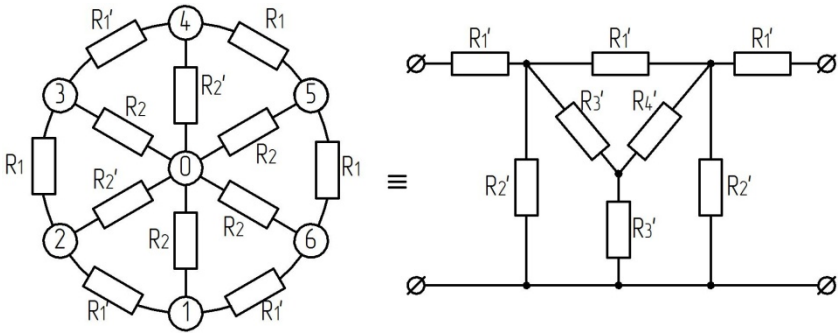


Рис. 2. К расчету межклеточного сопротивления

Преимуществами электромагнитного метода диагностики являются бесконтактное обследование, небольшие габаритные размеры и невысокая стоимость аппаратуры, простота процедуры обследования и возможность проводить диагностику в полевых условиях, когда другие методы недоступны.

Список литературы

1. *Васильев, Ю. М.* Клеточная поверхность и реакция клетки / Ю. М. Васильев, А. Г. Маленков. – Л. : Медицина. – 1968. – 296 с.

2. *Сетлоу, Р.* Молекулярная биофизика / Р. Сетлоу, Э. Поппард. – М. : Мир, 1964. – 441 с.

3. *Котык, Н.* Мембранный транспорт / Н. Котык, К. Яначек. – М. : Мир, 1980. – 344 с.

4. *Хэм, А.* Гистология. Т. 1. / А. Хэм, Д. Кармак. – М. : Мир, 1983. – 272 с.

5. *Антонов, В. Ф.* Липиды и ионная проницаемость мембраны / В. Ф. Антонов.– М. : Наука, 1982. – 152 с.

6. *Альбертс, Б. А.* Молекулярная биология клетки Т. 1 / Б. А. Альбертс, Дж. Льюис и др. – М. : Мир, 1986. – 517 с.

7. *Ушаков, И. А.* Расчет параметров клетки // Вестник РГРТА. – Рязань : РГРТА, 2000. – № 8. – С. 59–64.

8. *Поликар, А.* Поверхность клетки и её микросреда. – М. : Мир, 1975. – 112 с.

9. *Берлинер, Р.* Перенос вещества через мембраны: Современные проблемы биофизики. Т. 2. – М. : ИЛ, 1961. – 141 с.

10. *Девытков, Н. Д.* Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н. Д. Девытков, М. Б. Голант, О. В. Бецкий. – М. : Радио и связь, 1991. – 168 с.

V. V. Miroshnikov, DSc in engineering, professor
A. V. Lavrenchenko, lecturer
E-mail: lavchenok@mail.ru
Vladimir Dahl Lugansk National University, LPR

Construction of Electromagnetic Control Systems for the Concentration of Conductive Substances in the Human Body

A numeral calculation of biological membrane, protoplasm and cells parameters is given taking into account resistance of intercellular space. The obtained results allow using it's in the construction of electromagnetic monitoring systems to determine the concentration of conductive foreign objects in the human body.

Keywords: conductivity, equivalent scheme, biological object, converter, diagnostics.

УДК 621.179.14

В. В. Мирошников, д-р техн. наук, зав. кафедрой
Т. В. Петрущенко, канд. техн. наук, доц.
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля, ЛНР

Анализ дефектов действующих промышленных объектов

Предложен метод формирования магнитного зондирующего поля, который позволяет создавать устройства любой геометрии и геометрических размеров с требуемой величиной и однородностью магнитного поля.

Ключевые слова: дефект, магнитное поле, катушка намагничивания, поле рассеяния.

Введение

Работа металлических оболочек в агрессивной среде при высоких давлениях и температурах (нефтехимические реакторы, трубопроводы, котлы и т. д.) сопровождается процессом образования дефектов, который начинается с первого дня эксплуатации и длится все время работы оборудования. Развитие процесса образования и развития дефекта во времени с учетом различных дефектов структуры и микротрещин необходимо рассматривать, вводя время как характеристику

© Мирошников В. В., Петрущенко Т. В., 2018

пластического течения и разрушения. Учитывая, что время является одним из определяющих факторов, приводящих объект к разрушению, необходимо проводить постоянный контроль состояния стенки объекта, то есть осуществлять мониторинг технического состояния. Мониторинг состояния объекта становится возможным только тогда, когда мы умеем решать задачу его диагностики в течение весьма длительного времени. Последнее определяется интервалом развития дефектов, которые мы хотим зарегистрировать посредством мониторинга.

Отсюда следует принципиальный вывод о том, что интервал времени мониторинга, в течение которого осуществляется подготовка к измерениям, измерения, диагностика состояния, выдача предварительных данных персоналу, оценка информации последним и принятие решения, занимает достаточно большой промежуток времени. Поэтому необходимо определять основные требования к контрольно-диагностической аппаратуре, которые обеспечили бы достоверность информации.

Магниточувствительный элемент с источником зондирующего магнитного поля должен устанавливаться на поверхности объекта контроля без нарушения его целостности в зоне наиболее вероятного или уже появившегося дефекта и на протяжении всего времени мониторинга сохранять свои метрологические характеристики, иметь систему диагностики и калибровки. Источник зондирующего поля обеспечивает постоянную величину зондирующего поля в заданном объеме. Таким образом, задачу построения первичных преобразователей для проведения мониторинга разделяют на две: разработка первичного преобразователя и разработка устройства формирования зондирующего магнитного поля.

Теоретические сведения

Рассмотрим требования, предъявляемые к разработке устройств, формирующих зондирующее магнитное поле.

Существует стремление авторов получить математические зависимости для поля рассеяния дефекта за счет идеализации в постановке задачи. В лучшем случае используется магнитная проницаемость материала в зависимости от величины намагничивающего поля [1] и не используются другие параметры петли гистерезиса. Если для расчета используется метод вторичных источников, то считается, что имеется только поверхностный магнитный заряд, а если учитывать объемный [2], то полагается, что плотность его в некоторой области постоянная, причем нет методики определения границ этой области. Вышеперечисленные недостатки приводят к выводу, что требуется создание метода анализа магнитных полей

дефектов, основанных на современных вычислительных средствах [3]. Решение этой задачи является составной и необходимой частью при создании приборов магнитного контроля водосодержащих конструкций. Современная теория полей рассеяния, позволяющая с достаточной для практики дефектоскопии точностью рассчитывать магнитное поле рассеяния дефектов, создана в основном для поверхностных дефектов [4]. Элементы этой теории позволяют также рассчитывать поле рассеяния подповерхностных дефектов. При этом используются понятия поверхностных и объемных магнитных зарядов.

Для подповерхностных существует несколько положений, которые подтверждены многочисленными экспериментами, а именно [5]: поле дефекта сильно зависит от величины раскрытия дефекта; для дефектов с малым раскрытием зависимость между величиной поля дефекта и напряженностью первичного поля H_0 должна изображаться кривой, близкой по характеру к кривой намагничивания вещества изделия; в связи с этим поле дефекта с малым раскрытием перестает возрастать после того, как первичное поле перейдет значение, при котором начинается крутой сгиб кривой намагничивания; поле дефекта с большим раскрытием (объемного), в частности, дефекта с круговым профилем, должно отображать в основном начальную часть кривой намагничивания и, следовательно, линейно нарастать с увеличением H_0 в области не слишком высоких значений H_0; в разнородных по своим магнитным свойствам материалах одинаковым значениям индукции будут соответствовать и одинаковые поля дефектов; зависимость поля дефекта от магнитных свойств среды слабо выражена в области малых первичных полей H_0; она становится все более заметной при подходе к верхнему загибу кривой намагничивания. При весьма высоких значениях H_0 поле дефекта практически пропорционально M_s.

Все вышеприведенные выводы сделаны для ферромагнитного полупространства, в котором расположены подповерхностные дефекты.

Анализ полей вблизи расположенных дефектов проводился с целью селекции информационных сигналов от каждого дефекта. В [6] получены аналитические зависимости для составляющих напряженности магнитного поля расположенных рядом прямоугольных подповерхностных дефектов и их зависимость от расстояния между ними и от геометрических размеров дефектов.

В рассматриваемом случае имеются специфические особенности геометрии подповерхностных дефектов, к которым можно отнести следующее: дефекты расположены на близком расстоянии друг от

друга и величина этого расстояния $2d$ является случайной; случайной величиной является и глубина дефектов h; магнитные характеристики материала контролируемого изделия также со временем изменяются.

Вышеперечисленные особенности дефектов не позволяют идентифицировать каждый дефект в отдельности. Возможна только интегральная оценка степени разрушения внутренней стенки объекта контроля, которая, безусловно, будет связана с количеством дефектов и их геометрическими параметрами. Эта оценка должна быть выделена на фоне вариации параметров поля, связанного с изменением структуры металла, в частности коэрцитивной силы. Отсюда вытекают требования к системе построения математической модели информационного магнитного поля. Математическая модель поля дефектов должна без значительных затрат машинного времени позволить рассчитать поле дефектов на поверхности объекта контроля с учетом количества и геометрической формы дефектов, а также с учетом магнитных свойств материала. Поэтому принимаются следующие допущения: магнитное поле является плоскопараллельным; сложная геометрическая форма дефекта аппроксимируется более простой – прямоугольной; необходимы математические зависимости, позволяющие вынести магнитные заряды в нелинейной ферромагнитной области на ее поверхность; плотность вероятности распределения величин расстояния между дефектами и их глубин считаются величинами постоянными; ширина раскрытия каждого дефекта является параметром, который изменяется в процессе расчета. Благодаря принятым допущениям можно разработать математическую модель для одного подповерхностного дефекта [7], а затем построить алгоритм расчета для группы дефектов с различными параметрами d, $2b$ и h.

Особенностью системы контроля стенок реакторов (СР) является то, что необходимо исследовать на степень разрушения значительную площадь стенки. Согласно техническим требованиям должно быть исследовано не менее 3–7 % поверхности реактора, что в настоящее время выполняется путем остановки технологического процесса и вырезания из стенок контрольных образцов. Поэтому магнитный контроль должен осуществляться на площади не меньшей, чем это установлено техническими требованиями. Существующие устройства контроля, такие как импульсно-локальные коэрцитиметры [8, 9], для этой цели не пригодны, т. к. контролируют малый участок площади по градиенту магнитного поля рассеяния намагниченного участка. Информативный параметр для импульсно локального метода – величина

градиента ∇H остаточного локального магнитного поля, сохраняющегося на изделии при его намагничивании импульсами магнитного поля, создаваемого соленоидом, ось которого перпендикулярна поверхности испытуемого изделия [10]. Однако существующие устройства импульсно-локального метода действия измеряют один параметр поля в одной точке, что не приемлемо для магнитного метода контроля СР. Но идея ступенчатого намагничивания этого метода вполне может быть использована для контроля намагниченной площади стенки.

Предлагаемый метод контроля СР, подверженных действию водорода и разрушающихся под этим воздействием, заключается в следующем. Плоской прямоугольной катушкой намагничивается площадь стенки размером $2a \times 2c$. Катушка крепится непосредственно на СР. Внутри катушки расположены матрицы магниточувствительных элементов для измерения магнитного поля [11].

Согласно данным экспериментальных исследований, приведенных в [12], следует, что если нанести магнитную метку на поверхность ферромагнитного изделия, то определить механические характеристики металла по одному параметру магнитной метки невозможно. Требуется исследование топографии вертикальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния для формирования заключения о физических параметрах металла. Поэтому в предлагаемой системе топография вертикальной составляющей магнитного поля измеряется в статике матрицей ферромодуляционных элементов [13]. После снятия информации с каждого ферромодуляционного элемента матрицы делается заключение о топографии вертикальной составляющей магнитного поля и о степени разрушения СР.

Постановка и решение задачи

Постановка задачи по расчету системы намагничивающих катушек формулируется так (рис. 1). Необходимо в области V_{M} создать однородное магнитное поле, вектор напряженности которого $\overline{H_0} = \text{const}$ во всех точках $Q \in V_M$.

Катушка намагничивания содержит три секции с различным значением тока в каждой секции. Таким образом, в объеме V_{M}, имеющем форму параллелепипеда с размерами вдоль осей x, y, z соответственно $2a$, $2b$, $2c$, требуется создать некоторое магнитостатическое поле $\overline{B}(x, y, z)$ (в нашем случае однородное, направленное вдоль оси y). Используя метод зеркальных изображений, имеем 6 секций катушек.

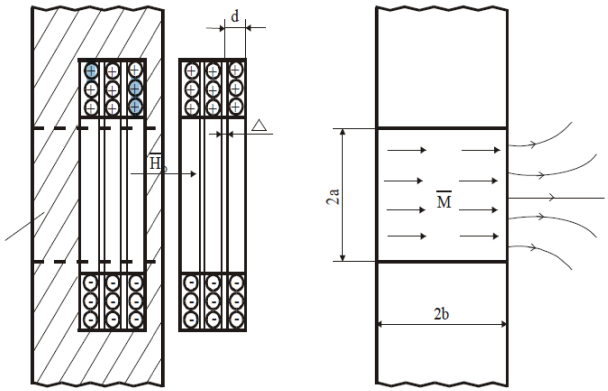


Рис. 1. Общий вид синтезируемой катушки:
а – катушка у поверхности СР; *б* – намагниченный участок СР

Будем создавать это поле с помощью катушки, представляющей собой совокупность N бесконечно тонких катушек [14], витки которых имеют прямоугольную форму и лежат в плоскостях, параллельных плоскости $x0z$. Толщины секций катушек и зазоры между ними обозначены соответственно через $d_j\,(j=\overline{1,N})$ и $\Delta_j\,(j=\overline{1,N-1})$, причем $d_j>0;\ \Delta_j\ge 0$. Все тонкие катушки изготовлены из провода одного и того же сечения. Искомым будет число витков тонких катушек $W_1,\ W_2,\ ..,W_N$. Вначале определяются токи $i_1^{(1)},i_2^{(1)},...,i_N^{(1)}$ бесконечно тонких прямоугольных витков, размеры которых вдоль осей x и z равны внутренним размерам проектирования тонких катушек.

Согласно формуле Био-Савара - Лапласа, можно найти индукцию единичного тока j-го витка в объеме V_M.

Будем искать точки $i_j^{|1|}\left(j=\overline{1,w}\right)$ из условия [15]

$$\left\|\overline{B}\left(x,y,z\right)-\sum_{j=1}^{N}i_j^{(1)}B_j^{(1)}\left(x,y,z\right)\right\|=\min. \qquad (1)$$

Задача (1) сводится [16] к заведомо совместной системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^{N}\left(\overline{B_j^{(1)}},\overline{B_k^{(1)}}\right)i_j^{(1)}=\left(\overline{B}\ ,\overline{B_k^{(1)}}\right),\quad k=\overline{1,w}. \tag{2}$$

Решением системы (2) будет совокупность токов $i_1^{(1)},i_2^{(1)},...,i_N^{(1)}$. После этого находится магнитное поле этих токов $B_N^{(1)2}(x,y,z)$ и погрешность $\eta_N^{(1)}=\left\|\overline{B}\ -\overline{B_N^{(1)}}\right\|\Big/\left\|\overline{B}\right\|$. Далее по найденным значениям токов определяется первое приближение совокупности тонких катушек, то есть найденные токи распределяются по сечениям тонких катушек с учетом коэффициентов заполнения. В результате находятся размеры катушек в первом приближении, то есть $h_1^{(1)},h_2^{(1)},...,h_N^{(1)}$.

Найдя параметры первого приближения совокупности тонких катушек, необходимо найти поле в объеме V_c, создаваемое этими катушками $B^{(1)}(x,y,z)$ [17], и погрешность $\eta^{(1)}$. Если эта погрешность превышает погрешность $\eta_N^{(1)}$, то необходимо выполнить второе приближение, располагая бесконечно тонкие прямоугольные витки сверху тонких катушек первого приближения и затем распределяя найденные в них токи по сечениям тонких катушек. Сечение тонких катушек выбирается из допустимой относительно нагрева плотности тока. Итерационный процесс прекращается после *n*-го шага, тогда наступает приближенное равенство $\eta^{(n)}=\eta_N^{(n)}$.

По предложенной методике был приведен расчет систем катушек намагничивания со следующими параметрами: h = 0,025 м, a = 0,1 м, b = 0,09 м. В объеме 0,03×0,07×0,065 м^3 синтезировалось однородное магнитное поле с вектором индукции B = 0,1 Тл. Получены следующие значения токов $i_1=3{,}2\cdot10^3\,A; i_2=4{,}2\cdot10^3\,A; i_3=5{,}4\cdot10^3\,A.$ Погрешность расчета не превышала η = 6 %.

Выводы. Предложенный метод формирования магнитного зондирующего поля позволяет создавать устройства любой геометрии и геометрических размеров с требуемой величиной и однородностью магнитного поля. Импульсный режим питания обеспечивает малое энергопотребление, что дает возможность применять автономное питание.

Список литературы

1. *Аркадьев, В. К.* Электромагнитные процессы в металлах. – Ч. 1. – М. ; Л. : Гл. ред. энергетической литературы, 1934. – 230 с.

2. *Янус, Р. И.* О коэффициентах размагничивания ферромагнитных стержней // Сборник, посвященный семидесятилетию академика А. Ф. Иоффе. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1950. – С. 402–410.

3. *Мирошников, В. В.* Расчет приращения поля дефекта // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк : ДГТУ. – 2002. – С. 115–120.

4. *Новикова, И. А.* Теоретические исследования магнитостатических полей поверхностных дефектов // Электромагнитные методы измерения и контроля. – Томск : ТГУ, 1985. – С. 28–38.

5. *Мирошников, В. В.* Экспериментальное исследование магнитных полей рассеяния дефектов // Вісник Східноукраїнського національного университету. –Луганськ СНУ, 2000. – Т. 32. – № 10. – С. 154–158.

6. *Мирошников, В. В.* Индукционные магниточувствительные элементы. – Луганск : ВНУ. – 2001. – 140 с.

7. *Мирошников, В. В.* Модель дефекта водородосодержащих конструкций // Вісник СНУ їм. В.Даля. – 2002. – № 7. – С. 30–34.

8. *Власенко, В. П.* Автоматический феррозондовый коэрцитиметр ФК-10М / В. П. Власенко, Ю. Л. Наугольнов, С. Б. Сластинин // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 131–134.

9. *Захаров, В. А.* Полуавтоматический цифровой коэрцитиметр КИФМ-3 / В. А. Захаров, Э. М. Бараз, В. М. Францевич // Дефектоскопия. – 1977. – № 3. – С. 132–133.

10. *Михеев, М. Н.* Использование необратимых магнитных характеристик при перемагничивании ферромагнетиков в магнитном структурном анализе сталей и сплавов / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов // Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля. – Свердловск, 1982. – С. 3–10.

11. *Мирошников, В. В.* Конструкція магнетного приладу безперервного контролю великогабаритних об'єктів / В. В. Мирошников, С. М. Щвець // Матеріали 4-ої Національної науково-технічної конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика-2003" (НКТД-2003). – Київ ; УТНКТД. – 2003. – С. 227–232.

12. *Зацепин, Н. Н.* Экспериментальное исследование топографии магнитного поля от естественных поверхностных дефектов в ферромагнитных шарах // Журнал технической физики. – 1964. – Вып. 7. – С. 1224–1228.

13. *Miroshnikov, V.* The theory of matrix magnetosensitive sensor on the basis of ferroprobes // Proceedings of the XV Symposium Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits: September 22–24, 1998, Liége, Belgium. – Poznań : TU Poznań, Inst. of Industrial Electrical Engineering, 1998. – Pp. 103–105.

14. *Пономарев, Ю. Ф.* Исследование электромагнитных явлений в магнитных модуляторах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Свердловск, 1966. – 180 с.

15. *Загидулин, Р. В.* Магнитное поле поверхностного дефекта в ферромагнитной пластине / Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1991. – № 8. – С. 33–39.

16. *Бамс, К.* Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бамс, П. Лауренс. – М. : Энергия, 1970. – 83 с.

17. *Курбатов, П. А.* Анализ распределения намагниченности методом регуляризации / П. А. Курбатов, Э. В. Кузнецов, П. П. Лунин // Методы и приборы автоматического неразрушающего контроля. – Рига, 1980. – С. 128–136.

V. V. Miroshnikov, DSc in engineering, professor
T. V. Petruschenko, CSc in engineering, associate professor
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Volodymyr Dahl Lugansk National University, LPR

Analysis of Defects in Operating Industrial Facilities

A method is proposed for the formation of a magnetic probing field, which allows the creation of devices of any geometry and geometric dimensions with the required magnitude and uniformity of the magnetic field.

Keywords: defect; magnetic field, magnetic conductinity, leakage field.

УДК 620.179.16

В. В. Муравьев, д-р техн. наук, зав. кафедрой
М. А. Синцов, руководитель лаборатории
А. Ю. Будрин, магистрант
А. В. Зорин, студент
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Акустическая структуроскопия усталости при циклическом нагружении стальных прутков*

В статье обсуждаются вопросы возможности оценки изменения скорости ультразвуковой волны в прутках при усталости под воздействием циклических нагрузок по схеме консольного изгиба с кручением. Для оценки скорости волн использован метод многократных отражений по сечению прут-

© Муравьев В. В., Синцов М. А., Будрин А. Ю., Зорин А. В., 2018

*Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

ка. Представлены результаты изменения скорости в прутках под увеличением массы, а также с увеличением количества циклов нагрузки.

Ключевые слова: скорость ультразвуковой волны, электромагнитно-акустический преобразователь, усталость, прутковый прокат.

Введение

Циклические (периодические многократно повторяющиеся) нагрузки характерны для большинства машиностроительных конструкций, таких как оси, валы, штоки, пружины, шатуны и т. д. Как показывает практика, нагрузки, циклически изменяющиеся во времени по величине и по знаку, при наличии концентратора могут привести к разрушению конструкции при напряжениях, существенно меньших, чем предел усталости. Такое разрушение принято называть «усталостным». Механизм усталостного разрушения во многом связан с дефектностью структуры материалов (дефекты кристаллической решетки, различие размеров и ориентации зерен, состояние их границ, наличие неметаллических включений, шлаков, примесей), дефектами поверхности материала (царапины, коррозия), дефектами технологического и эксплуатационного происхождения и т. д. В связи с указанной неоднородностью при переменных напряжениях на границах отдельных включений и вблизи микроскопических пустот и различных дефектов возникает концентрация напряжений, которая приводит:

– к микропластическим деформациям сдвига (при этом на поверхности объекта могут появляться полосы скольжения) и накоплению сдвигов (которое на некоторых материалах проявляется в виде микроскопических бугорков и впадинок – экструзий и интрузий);

– затем происходит развитие сдвигов в микротрещины, их рост и слияние;

– на последнем этапе появляется одна или несколько макротрещин, которые интенсивно развиваются при циклических нагрузках [1].

Одним из основных информативных параметров при определении структурных изменений является скорость распространения ультразвуковых (УЗ) волн [1, 3].

Цель работы – исследование влияния накопленной поврежденности металла прутков на скорость ультразвуковых волн в результате циклического нагружения по схеме консольного изгиба с вращением.

Методика измерений. Результаты исследований

В эксперименте представлены результаты измерений скорости УЗ-волны с учетом времени прихода импульсов многократных отражений и с обработкой корреляционной функцией [4–6].

При акустических исследованиях пруткового проката использованы проходные электромагнитно-акустические (ЭМА) преобразователи, основное преимущество которых – бесконтактность, позволяющая получать серию многократных отражений по диаметру прутка [7–9].

Циклические нагружения обеспечивались с помощью специально разработанной установки для испытаний на усталость, которая представлена на рис. 1.

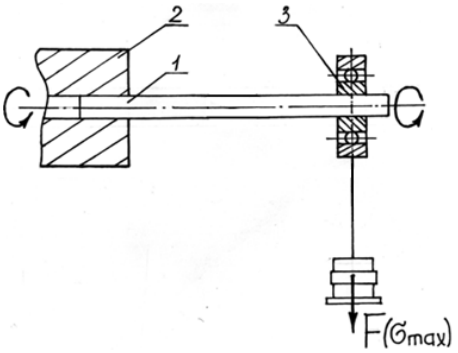
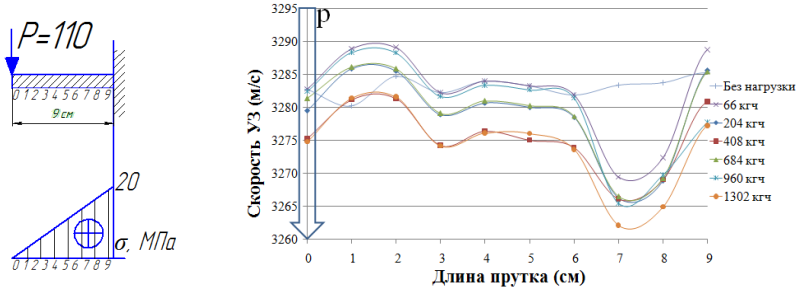


Рис. 1. Схема нагружения при испытаниях на усталость:
1 – образец; *2* – патрон; *3* – подшипник

Образец *1*, закрепленный в патроне *2* машины, вращается с определенной скоростью. На другом конце образца установлен подшипник *3*, через который передается поперечная сила *F*, изгибающая образец. При вращении образца в его наружных волокнах будут возникать попеременно растягивающие и сжимающие напряжения (симметричный цикл). Циклическое нагружение через определенное число циклов в зависимости от силы *F* приведет к разрушению образца, после чего нагружение останавливается и фиксируется число циклов (число оборотов) до разрушения образца.

Для испытания на усталость взят пруток из стали марки 40Х длиной 27 см, диаметром 19 мм. На плечо длиной 9 см подвешивался груз, который с ростом числа циклов увеличивали для накопления повреждений (рис. 2). Для учета влияния изменения диаметра прутка на

скорость УЗ-волны в процессе испытаний проводили измерения диаметра по всей длине прутка цифровым штангенциркулем с точностью до 0,01 мм. В зоне максимального напряжения при увеличении нагрузки диаметр прутка уменьшился на 0,09 мм.



а *б*

Рис. 2. Эпюра напряжений (*а*) и распределение скорости УЗ-волны в прутке из стали 40Х (*б*)

По распределению скорости УЗ-волны в прутке видно, что максимальное ее изменение происходит на расстоянии 7 см от левого торца в зоне максимальных напряжений. Изменение скорости волн при увеличении нагрузки и числа циклов показано на рис. 3.

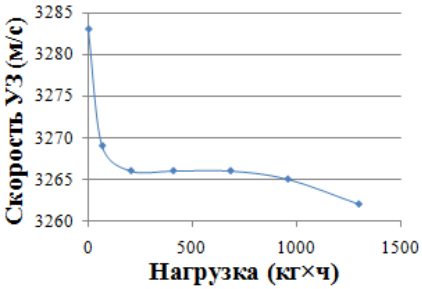


Рис. 3. Уменьшение скорости УЗ-волны в прутке из стали 40Х в зоне максимальной нагрузки с увеличением числа циклов

Кроме прутка из стали 40Х исследован пруток из нержавеющей стали 05Х16Н4Д2Б длиной 45 см, диаметром 17,32 мм. Исследовано 24 см прутка (зона влияния нагрузки). Увеличение нагрузки не по-

влияло на диаметр прутка, но способствовало изменению скорости распространения УЗ-волны (рис. 4).

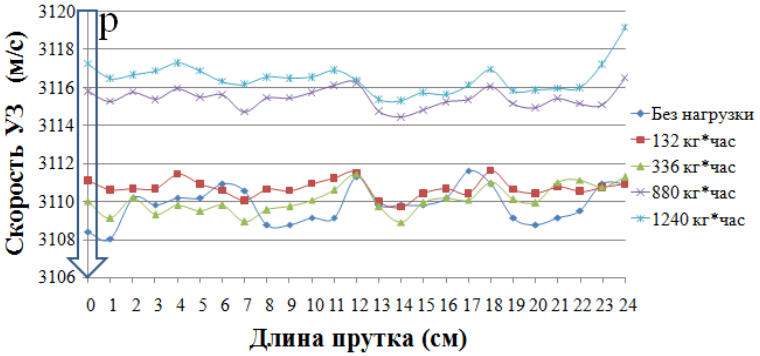


Рис. 4. Распределение скорости УЗ-волны в прутке из нержавеющей стали 05Х16Н4Д2Б

По распределению скорости УЗ-волны в прутке видно, что максимальное ее изменение – на расстоянии 24 см от левого торца в зоне максимального напряжения (рис. 5).

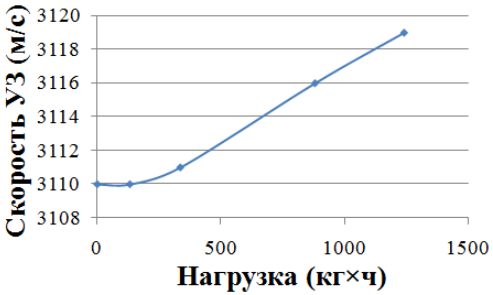
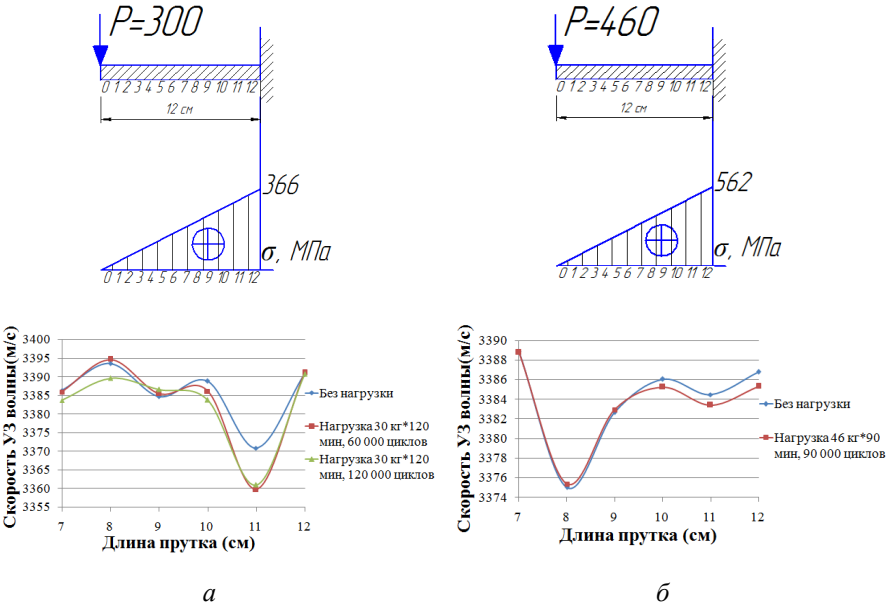


Рис. 5. Изменение скорости УЗ волны в прутке из стали марки 05Х16Н4Д2Б в зоне максимального напряжения

С ростом числа циклов и величины нагрузки наблюдается увеличение скорости распространения УЗ-волны в прутке, что объясняется появлением мартенсита деформации и соответственно уменьшением аустенитной фазы. Скорость волн в аустените существенно меньше, чем в ферритных и мартенситных структурах.

Дополнительно проведены эксперименты с консольной нагрузкой, составляющей от 40 до 60 % предела текучести для выделения влияния числа циклов на изменение скорости распространения УЗ-волны в прутках из стали марки 40Х. Два прутка, имеющие одинаковые диаметры сечения (10 мм), подверглись средней нагрузке (300 Н) (рис. 6, *а*) и максимальной нагрузке ≈0,6σ_{02} (460 Н) (рис.6, *б*), при которой возможно возникновение микротрещин и дефектов.



а *б*

Рис. 6. Распределение скорости распространения УЗ-волн в прутках из стали марки 40Х

Результаты показали, что на обоих прутках при воздействии данных нагрузок уменьшается скорость распространения УЗ-волны. При этом образец (рис. 6, *б*) не выдержал нагрузки 0,6σ_{02} (460 Н) больше 90000 циклов, произошло его разрушение.

Выводы

Проведенные эксперименты по измерению скорости поперечных УЗ-волн при циклических нагрузках прутков дают хорошие информативные данные по структурным изменениям при усталости материала.

Возможность реализации ЭМА-метода контроля на многократных отражениях позволяет существенно повысить чувствительность к развивающимся микродефектам при анализе сигнала на дальних отражениях и обеспечить высокую точность определения скорости волн.

Список литературы

1. *Муравьев, В. В.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 66–70.

2. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – №. 8. – С. 20–28.

3. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

4. 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. 3–12.

5. Анализ отражённых сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // Автометрия. – 2016. – № 4. – С. 62–70.

6. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова //Дефектоскопия. – 2015. – №. 7. – С. 17–23.

7. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнито-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

8. *Муравьева, О. В.* Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократных отражений / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. 2015. – №. 12. – С. 11–19.

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

V. V. Muravev, DSc in engineering, head of department
M. A. Sintsov, head of laboratory
A. Yu. Budrin, magister student
A. V. Zorin, student
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Acoustic Fatigue Structurocopy under Cyclic Loading of Steel Bars

The article discusses the issues of the possibility of estimating the change in the speed of an ultrasonic wave in bars when fatigue is caused by cyclic loads according to the cantilever bending scheme with torsion. To estimate the velocity of waves, the method of multiple reflections over the cross section of the rod was used. The results of the change in the speed in bars under the increase in mass are presented, as well as with the increase in the number of load cycles.

Keywords: speed of ultrasonic wave, electromagnetic-acoustic transducer, fatigue, bar rolling.

УДК 620.179.16

В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой
К. А. Тапков, аспирант
E-mail: izhjup@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

К вопросу приемочного контроля остаточных напряжений в рельсах*

В данной работе рассмотрен вопрос неразрушающего ультразвукового контроля остаточных напряжений в рельсах в зависимости от расхождения паза, полученного методом продольной разрезки шейки и являющегося браковочным критерием уровня остаточных напряжений. При математическом моделировании учтены технология изготовления рельса и различный характер распределения значений напряжений в элементах рельса. Получено удовлетворительное соответствие результатов моделирования напряженного состояния и экспериментальных измерений акустоупругим методом.

© Муравьев В. В., Тапков К. А., 2018

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00051)

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, рельс, напряженно-деформированное состояние, моделирование.

Введение

В связи с ростом скоростей движения железнодорожного транспорта, интенсивности грузоперевозок и пассажирского потока всё возрастающую роль в обеспечении безопасности эксплуатации имеет безотказность элементов железной дороги. Важное место в этом играет надежность рельсов, наличие опасных дефектов, которые могут привести к экологическому и материальному ущербу, а также человеческим жертвам в результате схода подвижного состава.

Одной из наиболее частых причин разрушения многих металлических конструкций, в том числе и рельсов, является высокий уровень остаточных напряжений, которые могут достигать предела текучести, особенно в области дефектов [1, 2]. Это приводит к ускоренному развитию дефектов и значительно снижает срок службы изделий [1–3].

Таким образом, значение остаточных напряжений в рельсах является важным параметром, от которого зависит время работы изделия и вероятность развития в нем дефектов. Знание этой величины повысит эксплуатационную надежность рельсов и железнодорожного транспорта в целом. Остаточные напряжения возникают как во время эксплуатации рельса, так и при его производстве из-за неравномерности охлаждения частей рельса при термообработке, деформации рельса при прокатке и прочих факторах [4–6]. На данный момент применяются две технологии по изготовлению рельсов.

Ранее широко применялась технология объемной закалки рельсов с повторным нагревом и дальнейшим отпуском. В проходной печи с роликовым подом производится нагрев рельса до температуры 830–840 ºС в течение 42 минут, после чего осуществляется выдержка в течение 10–12 минут. Объемная закалка происходит при охлаждении в масле в течение 5 минут до температуры, не превышающей 100 ºС. Производству рельсов при этом сопутствует высокий расход масла, большое количество энергии тратится на повторный нагрев [4].

На данный момент идет отказ от технологии объемной закалки рельса в масле, современные технологии производства рельс, примененные как в отечественной (ЕВРАЗ ЗСМК, МЕЧЕЛ ЧМК), так и в зарубежной (Nippon Steel) промышленности, включают в себя дифференцированное термоупрочнение, при котором различные элементы рельса (головка, шейка) имеют различную скорость охлаждения. Это

приводит к тому, что распределение остаточных напряжений неоднородно по сечению рельса. Для нахождения напряженного состояния в этом случае необходимо провести моделирование напряженно-деформированного состояния рельса после его термической обработки. Так, оптимальный уровень для рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э78ХСФ достигается закалкой от температур свыше 825 °С в течение не менее 150 с; при давлении сжатого воздуха 1500–2200 мм вод. ст. – в течение не менее 110 с [5].

Контроль остаточных напряжений в шейке рельса проводится согласно ГОСТ 51685–2013. Так, для проведения контроля рельсов Р65 отбирается проба длиной 600 мм, в ней вырезается паз длиной 400 мм и толщиной 6 мм, а в качестве браковочного критерия служит величина расхождения паза. При превышении значения расхождения в 2 мм партия рельсов признается бракованной.

Обобщив, можно выделить различное напряженно-деформированное состояние рельсов, получаемых при использовании этих технологий. При этом не учитывается технология изготовления рельсов, различие напряженного состояния по длине в пределах одного рельса, различный уровень и другие параметры, предположительно способные влиять на значение расхождения паза рельса. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние рельса при изготовлении его вышеобозначенными способами.

Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при изготовлении с использованием объемной закалки

Расхождение возникает вследствие характера остаточных напряжений: в подошве и головке рельса напряжения носят сжимающий характер, а в шейке рельса напряжения носят растягивающий характер [4, 6, 7].

Моделирование позволяет получить значения остаточных напряжений, что необходимо для оценки жизненного цикла рельса. Адекватность модели была проверена экспериментальным исследованием напряжений акустоупругим методом. Моделирование было произведено в программе COMSOL Multiphysics.

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1. **Результаты моделирования рельса, изготавливаемого по технологии объемной закалки**

Расхождение паза, мм	Продольное направление			Вертикальное направление		
	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа
0,19	4,8	7,6	5,3	–0,6	10,2	–1,0
0,55	14,5	23,4	16,2	–1,3	27,1	1,3
0,93	24,0	39,1	27,7	–2,4	45,4	–2,6
1,3	34,5	54,6	39,6	–5,3	63,1	–5,3
1,67	43,7	70	49,8	–11,0	81,9	–8,9
2,04	53,5	86,3	61,9	–12,8	100,1	–9,1
2,45	63,6	101,7	69,6	–15,1	118,3	–11,0

На рис. 1 представлен график распределения напряжений в продольном направлении при расхождении паза в 2 мм, что является максимально допустимым значением согласно ГОСТ. На рис. 2 представлен график распределения напряжений в вертикальном направлении также при значении расхождения паза в 2 мм.

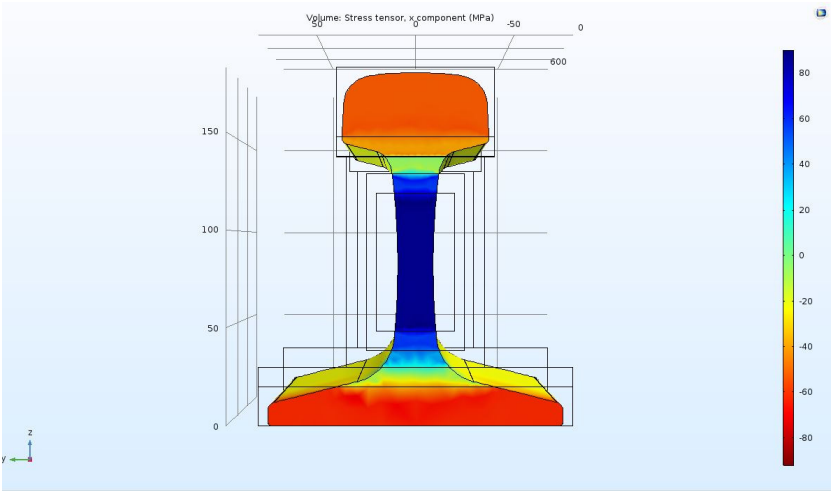


Рис. 1. Распределение продольных напряжений в сечении рельса

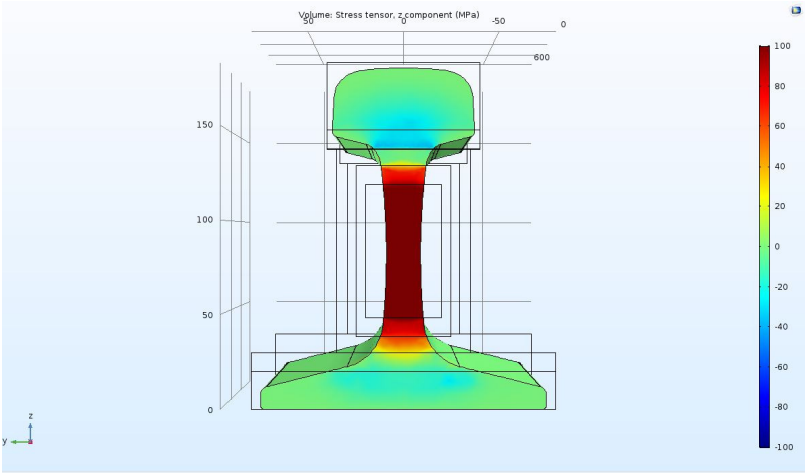


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений сечении рельса

Моделирование напряженно-деформированного состояния рельса при изготовлении с использованием тепла прокатного нагрева и дифференцированном термоупрочнении

Особенностью технологии дифференцированного термоупрочнения является использование тепла прокатного нагрева и охлаждения головки сжатым воздухом. При этом наибольшие сжимающие напряжения образуются в головке, небольшие сжимающие – в подошве, растягивающие – в шейке рельса [7, 8].

Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics.

Таблица 2. **Результаты моделирования рельса, изготавливаемого по технологии дифференцированного термоупрочнения**

Расхождение паза, мм	Продольное направление			Вертикальное направление		
	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа
0,46	–36,1	5,2	–1,0	–7,2	19,1	–1,3
0,77	–40,3	25,2	–3,2	–8,5	40,6	–2,6
1,08	–44,1	45,3	–5,6	–11,4	62,3	–4,5
1,39	–49,5	65,7	–6,3	–12,7	83,4	–7,5
1,71	–52,3	84,2	–6,7	–14,5	96,8	–7,7
2,01	–56,2	105,4	–8,3	–18,3	108,2	–10,8
2,32	–62,7	122,3	–9,4	–19,8	127,5	–13,3

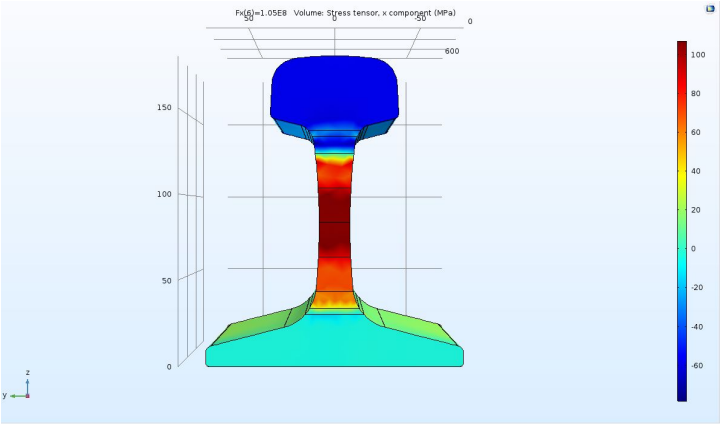


Рис. 3. Распределение продольных напряжений в сечении рельса при дифференцированной термообработке

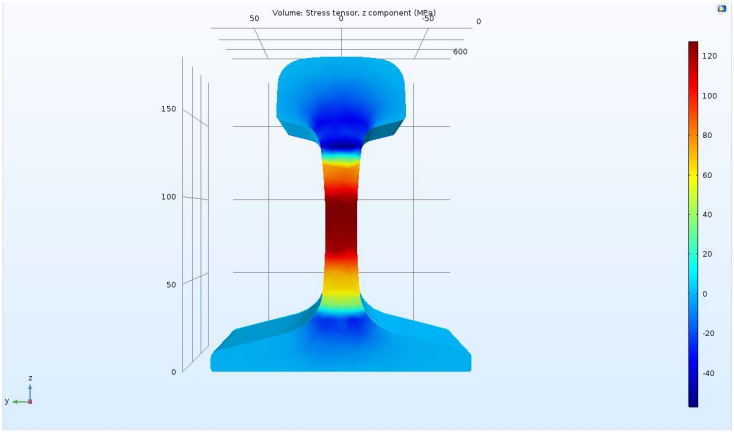


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений в сечении рельса при дифференцированной термообработке

Экспериментальное исследование напряженного состояния рельсов

Тензометрия проводилась акустоупругим методом, уже успешно применяемым для контроля ободьев железнодорожных колес [9, 10]. Напряжения в этом случае вычисляются следующим образом (1) [8–10]:

$$\sigma = D(\frac{\pm\Delta t}{t_1} - a_0), \quad (1)$$

где D = 145 ГПа – коэффициент акустоупругости, определенный экспериментально; a_0 – параметр акустической анизотропии; Δt – разность времени распространения волн в напряженном состоянии, с; t_1 – время распространения волны, поляризованной вдоль главных напряжений, с.

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 5 [11, 15]. Она включает в себя генератор электрических импульсов *2*, формирующий мощный зондирующий электрический импульс в объекте контроля *1*, ЭМА-преобразователь *3*, возбуждающий и принимающий короткие акустические импульсы поперечных волн, усилитель *4* и плату АЦП 5 [8].

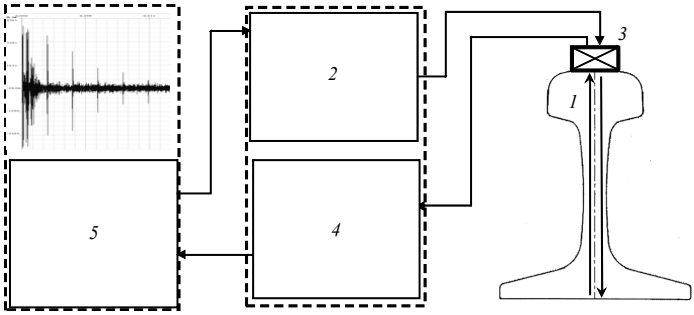


Рис. 5. Структурная схема установки: *1* – объект контроля; *2* – генератор; *3* – ЭМА преобразователь; *4* – усилитель; *5* – ПК с платой АЦП

Измерение на ЭВМ и обработка осциллограмм производилась в программной среде ПРИНЦ (св-во № 2011614594 от 21.04.2011 г.) [11].

Экспериментально было проверено утверждение, что значения напряжений в рельсах имеют существенные различия по сечениям рельсов. Для этого были произведены измерения в двух сечениях одного отрезка рельса. Результаты исследования сведены в табл. 3.

Табл. 3. **Результаты измерения напряжения в сечениях одного рельса**

Рельс, №	Сечение 1			Сечение 2		
	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа	Головка, σ, МПа	Шейка, σ, МПа	Подошва, σ, МПа
1	–16	45	–15	–30	42	–9
2	–39	10	–5	–46	43	–20

Результаты экспериментального измерения напряжений рельсов, изготавливаемых по технологии объемной закалки, и сравнения с результатами моделирования представлены в табл. 4. Результаты экспе-

риментального измерения напряжений рельсов с дифференцированным термоупрочнением и сравнение с результатами моделирования представлены в табл. 5.

Табл. 4. **Результаты экспериментального исследования рельсов, изготавливаемых по технологии объемной закалки**

Рельс, №	Напряжения, МПа			Погрешность измерения, МПа
	Головка	Шейка	Подошва	
Моделирование (объемная закалка, расхождение 2 мм)	–53	86	–62	–
1 (эксперимент)	–48	62	–59	±5
2 (эксперимент)	–64	93	–65	±5
3 (эксперимент)	–62	54	–72	±5
4 (эксперимент)	–62	62	–74	±5

Табл. 5. **Результаты экспериментального исследования рельсов с использованием дифференцированного термоупрочнения**

Рельс, №	Напряжения, МПа			Погрешность измерения, МПа
	Головка	Шейка	Подошва	
Моделирование (дифференцированное термоупрочнение, расхождение 2 мм)	–56	105	–8	–
1 (эксперимент)	–16	45	–15	±5
2 (эксперимент)	–39	10	–9	±5
3 (эксперимент)	–30	42	–5	±5
4 (эксперимент)	–46	43	–20	±5

Заключение

1) Расхождение паза, являющегося браковочным критерием рельсов по остаточным напряжениям в шейке рельса, есть функция многих величин, в частности распределения напряжений в шейке и головке рельса, которые, в свою очередь, зависят в том числе и от технологии изготовления рельсов.

2) Значения и характер распределения напряжений могут существенно различаться даже в пределах одного рельса, в связи с чем по различным отрезкам одного рельса будет различное расхождение паза, что обосновывает введение полного выходного контроля рельсов на производстве.

3) Вследствие вышеперечисленных положений предлагается вынести вопрос о необходимости корректировки ГОСТ 51685–2013 в части контроля остаточных напряжений.

Список литературы

1. Формирование структурно-фазовых градиентов в рельсах при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, К. В. Морозов, О. А Перегудов и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 3. – С. 59–65.

2. Эволюция структурно-фазовых состояний рельсов при длительной эксплуатации / Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов, О. А. Перегудов и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 262–267.

3. Никитина, Н. Е. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях / Н. Е. Никитина, А. В. Камышев, С. В. Казачек // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 51–60.

4. Микроструктура закаленных рельсов. / В. Е. Громов, А. Б. Юрьев, К. В. Морозов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк : Интер-Кузбасс, 2014. – 213 с.

5. Моделирование воздухоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов / К. В. Волков, Е. В. Полевой, М. В. Темлянцев, О. П. Атконова, А. М. Юнусов, А. Ю. Сюсюкин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 3 (9. – С. 17–23.

6. Покровский, А. М. Численное моделирование температурно- структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке / А. М. Покровский, Д. Н. Третьяков // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. – № 07. – С. 1–13.

7. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Н. Курбатов и др. // Изв. вузов. Строительство. – 2013. – № 7. – С. 103–109.

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. (Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. Estimation of the Residual Stresses in Rails Using Electromagnetic–Acoustic Introduction–Reception of Waves, Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2016, No. 10. – Pp. 1002–1005).

9. Бехер, С. А. Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации / С. А. Бехер, А. О. Коломеец // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 110–118.

10. Неразрушающий контроль : справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4 : в 3 кн. Кн. 1: Акустическая тензометрия / В. А. Анисимов, Б. И. Каторгин, А. Н. Куценко и др. – М. : Машиностроение, 2004. – 736 с

11. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С.А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243 – 250.

V. V. Muravev, DSc in engineering, professor, head of department
K. A. Tapkov, postgraduate student
E-mail: izhjup@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

To the Issue of Acceptance Check Out of the Residual Stresses in Rails

The theme of this paper is issue of non-destructive ultrasonic testing of the residual stresses in rails according to the discrepancy of the housing, which one is made by longitudinal breach. This discrepancy is criteria, that allow to decide if rail is broken or not. Modeling process of these stresses includes influence of the producing method and different type of the distribution stresses in different parts of rails. Also this modeling gave good cvorrespondance of the values of the stresses with experimental measurements, which were made by acoustoelastic effect.

Keywords: non-destructive testing, acoustoelasticity, rail, stress-strain state, modeling.

УДК 620.179.16

О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф.
В. В. Муравьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой
М. А. Синцов, руководитель лаборатории
В. С. Стрелков, А. Е. Шкляев, магистранты
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Влияние фактора разных плавок при производстве пруткового проката на скорости акустических волн*

Исследованы скорости стержневых и крутильных волн в прутковом прокате внутри одной и разных партий. Для возбуждения и приема волн использован бесконтактный электромагнитно-акустический способ. По результатам измерений скоростей поперечной волны по диаметру прутка методом многократных отражений и крутильных волн получены значения анизотропии. Диапазон изменения скоростей исследованных волн в прутках одной партии составляет до 9 м/с. В число основных влияющих на измеряемые па-

© Муравьева О. В., Муравьев В. В., Синцов М. А., Стрелков В. С., Шкляев А. Е., 2018
*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

раметры факторов входят внутренние напряжения, полученные при прокатке и рихтовке, структурная неоднородность по длине прутка после термической обработки, зональная ликвация по химическому составу и колебания диаметра по длине прутков. Эти факторы определяют анизотропию и разброс измеряемых параметров как внутри одной партии, так и в разных партиях.

Ключевые слова: скорость ультразвуковых волн, электромагнитно-акустический способ, химический состав стали.

Введение

При разработке акустических методик структуроскопии, например, оценки структурного и напряженно-деформированного состояния металла, предъявляются высокие требования к точности определения основных параметров ультразвуковых волн, в частности, скорости волн, которые связаны с параметрами состояния материала [1–3]. При этом на результаты измерений могут влиять факторы плавки и проката, т. е. отклонения химического состава в пределах марки стали, структурная неоднородность по длине прутка после термической обработки и внутренние напряжения, полученные при прокатке и рихтовке, колебания диаметра по длине прутка. Бесконтактный электромагнитно-акустический (ЭМА) способ возбуждения-приема не требует использования контактной жидкости, что дает возможность проводить контроль при шероховатой и загрязненной поверхности объектов, при высоких и низких температурах, а также для объектов, движущихся на высоких скоростях. Существенно, что с помощью ЭМА-преобразователей возможно формирование различных типов волн с различной поляризацией, что позволяет расширить число информативных параметров, чувствительных к структуре и несплошностям металла [4].

В работе предпринята попытка оценить влияние мешающих факторов плавки на результаты измерения скоростей нормальных (стержневой и крутильной) и поперечных волн радиальных направлений по сечению с осевой поляризацией в прутках различных партий.

Материалы и методы исследований

Для целей структуроскопии и дефектоскопии стального пруткового проката авторами разработана технология зеркально-теневого метода на многократных отражениях с использованием специализированных проходных ЭМА-преобразователей для излучения-приема поперечных и продольных волн радиальных направлений и накладных ЭМА-

преобразователей для излучения-приема рэлеевских волн по окружности прутка [5–6].

Исследования проведены на выборке прутков из конструкционной хромистой стали 40Х, изготовленных по ГОСТ 4543. Сталь качественная круглая со специальной отделкой поверхности длиной до 7 м и диаметром 44 мм по ГОСТ 14955–77. Проведены измерения скоростей акустических волн в 12 партиях, количество прутков в которых варьировалось от 32 до 52 в общем количестве 410 прутков (или от 2,5 до 3,8 тонны в партии). Измерения проведены в заводских условиях на прутках-заготовках утяжеленных насосных штанг условным размером ШУТ-44.

Согласно ГОСТ 4543 химический состав стали хромистой 40Х описывается табл. 1. В готовом прокате при соблюдении норм механических свойств и других требований настоящего стандарта допускаются отклонения по химическому составу (табл. 1). Для качественной стали массовая доля элементов не должна превышать норм: для фосфора – 0,035 %, серы – 0,035 %, остаточной меди – 0,3 %, никеля – 0,3 %.

Указанные факторы могут меняться как от плавки к плавке, так и внутри плавки, что следует учитывать при построении методик структуроскопии. Сталь 40Х в состоянии поставки подвергнута закалке или нормализации при температуре 860 °С с последующим охлаждением в масле и отпуску при температуре 520 °С с охлаждением в воде или масле. Механические свойства стали 40Х по ГОСТ 4543 в соответствии с данной термической обработкой иллюстрирует табл. 2.

Таблица 1. **Химический состав стали хромистой 40Х**

Массовая доля элементов, %							
Углерод	Допускаемые отклонения, %	Кремний	Допускаемые отклонения, %	Хром	Допускаемые отклонения, %	Марганец	Допускаемые отклонения, %
0,36–0,44	±0,01	0,17–0,37	±0,02	0,80–1,10	±0,05	0,50–0,80	±0,02

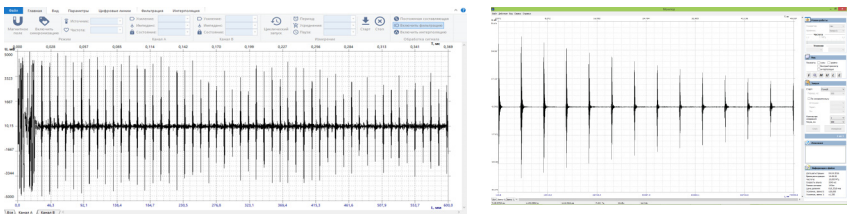
Таблица 2. **Механические свойства стали 40Х**

Механические свойства				
Предел текучести, $\sigma_т$, МПа	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение, δ, %	Относительное сужение, ψ, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2
785	980	10	45	59

Согласно ГОСТ 14955-77 «Сталь качественная круглая со специальной отделкой поверхности» для диаметра 44 мм имеют место предельные минусовые отклонения по диаметру в зависимости от квалитета: для *h*9 – 0,062 мм, *h*10 – 0,1 мм, *h*11 – 0,16 мм, *h*12 – 0,25 мм. Все указанные факторы могут меняться как внутри одной плавки, так и внутри разных партий.

Для исследований использованы экспериментальные установки, реализующие метод многократных отражений с использованием стержневых и крутильных нормальных волн и поперечных волн осевой поляризации радиальных направлений по сечению, реализуемых с использованием специализированных ЭМА-преобразователей проходного типа [7–10].

Регистрация и оценка принятых сигналов поперечных волн производится с использованием специализированного программного обеспечения «ПРИНЦ IX-3.2», стержневых и крутильных волн – с использованием программы «Монитор» [11–12]. Вид рабочего окна и серия импульсов многократных отражений поперечных волн по диаметру прутка и стержневых и крутильных волн по длине прутка представлены на рис. 1.



а *б*

Рис. 1. Характерные осциллограммы серии многократных отражений поперечной волны по диаметру прутка (*а*); крутильной волны по длине прутка (*б*)

Скорости распространения поперечных C_t волн рассчитываются по формуле:

$$C_{t,l} = \frac{D \cdot n}{t_n}, \qquad (1)$$

где D – диаметр прутка, n – число отражений, t_n – время n-го отраженного импульса в осциллограмме импульсов поперечных волн. Скоро-

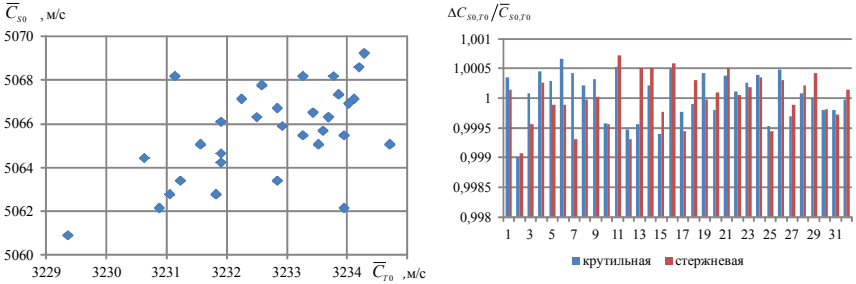
сти распространения стержневых C_{S0} и крутильных C_{T0} волн рассчитываются по формуле

$$C_{S0,T0} = \frac{2L \cdot n}{t_n}, \qquad (2)$$

где L – длина прутка, t_n – время n-го отраженного импульса в осциллограмме импульсов стержневых и крутильных волн.

Результаты и обсуждение

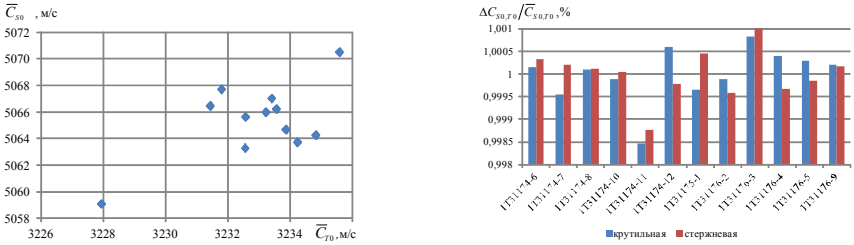
Диапазон изменения скоростей стержневых и крутильных волн в прутках одной партии составляет 9 и 5 м/с соответственно (рис. 2). В число основных влияющих на измеряемые параметры факторов согласно [1, 3] входят внутренние напряжения, полученные при прокатке и рихтовке, структурная неоднородность по длине прутка после термической обработки, зональная ликвация по химическому составу. Эти факторы определяют анизотропию и погрешность измеряемых параметров как внутри одной партии, так и в разных партиях. Другим влияющим фактором при расчете скорости волн по результатам измерения времени распространения и соответствующего пути является диаметр прутка, который согласно ГОСТ 14955–77 колеблется от 0 до –0,25 мм.



а *б*

Рис. 2. Корреляция скоростей стержневой и крутильной волн и гистограммы распределения отклонения скоростей стержневой и крутильной волн от средних значений внутри одной партии 1Т31174-10

Изменения скорости стержневых и крутильных волн в прутках разных плавок составили 11 и 8 м/с. На графике приведены средние значения в различных партиях (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Корреляция средних значений скоростей стержневой и крутильной волн и гистограммы распределения отклонения скоростей стержневой и крутильной волн от средних значений в различных партиях

Изменения скорости поперечной волны по диаметру прутка составили 14 м/с, что превышает отклонения по скорости крутильных и стержневых волн 8 и 11 м/с (табл. 3).

Таблица 3. **Акустические свойства прутков из стали 40Х**

Партия / кол-во прутков в партии	Средняя скорость крутильной волны $\overline{C}_{T0}$ ±СКО, м/с	Средняя скорость стержневой волны $\overline{C}_{S0}$, ±СКО, м/с	Средняя скорость поперечной волны $\overline{C}_t$, м/с	Коэффициент акустической анизотропии F_a
1Т31174-6 / 35	3233±2	5067±3	-	-
1Т31174-7 / 49	3231±4	5066±4	-	-
1Т31174-8 / 53	3233±2	5066±2	-	-
1Т31174-10 / 32	3233±2	5066±2	-	-
1Т31174-11 / 58	3228±3	5059±6	-	-
1Т31174-12 / 49	3235±2	5064±4	-	-
1Т31175-1 / 50	3232±2	5068±12	3255±3	-0,72
1Т31176-2 / 40	3233±2	5063±6	3241±4	-0,27
1Т31176-3 / 42	3236±2	5070±5	3244±3	-0,26
1Т31176-4 / 42	3234±2	5064±3	3247±1	-0,34
1Т31176-5 / 42	3234±1	5065±3	-	-
1Т31176-9 / 52	3234±2	5066±3	-	-
Среднее	3233±2	5065±3	3247±6	

Средняя скорость крутильной волны $\overline{C}_{T0}$, СКО по скорости крутильной волны. Средняя скорость стержневой волны $\overline{C}_{S0}$. Средняя скорость поперечной волны $\overline{C}_t$. Коэффициент акустической анизотропии F_a. Связь скорости поперечной и крутильной волны иллюстрирует рис. 4.

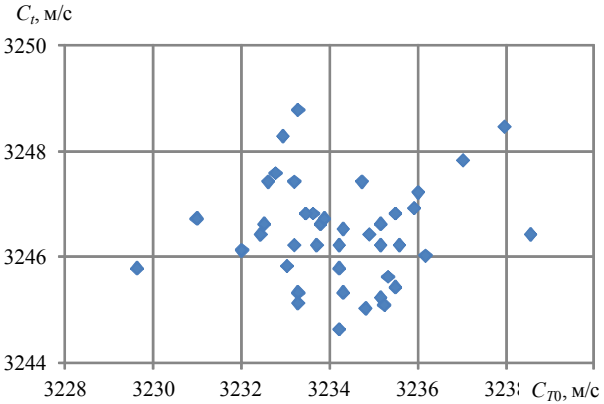
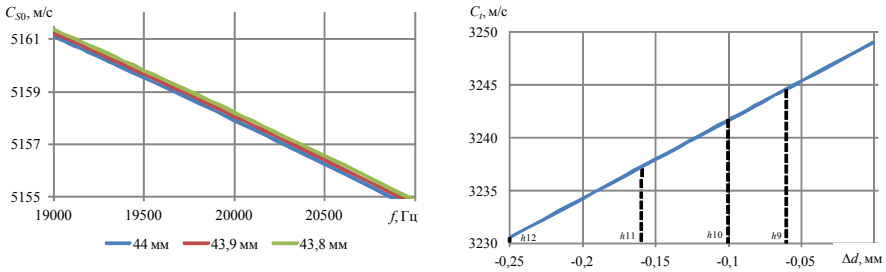


Рис. 4. Корреляция скорости поперечной и крутильной волн в партии 1Т31176-4

Влияние на скорость нулевой симметричной моды стержневой волны частоты и диаметра стержня показано на рис. 5, *а*, влияние на скорость поперечной волны изменений диаметра прутка в пределах квалитета иллюстрирует рис. 5, *б*.



а *б*

Рис. 5. Влияние на скорость нулевой симметричной волны частоты и диаметра стержня (*а*), влияние на скорость поперечной волны изменения по диаметру прутка в пределах квалитета (*б*)

Влияние колебаний диаметра на результаты измерения скорости в пределах квалитета от h9 – 0,062 мм до h12 – 0,25 мм в минусовую сторону составляет 14 м/с, что дает основание считать превалирующей роль этого фактора при объяснении значительного разброса от 2 до 6 м/с в оценке скорости волн.

Выводы

Диапазон изменения скоростей стержневых и крутильных волн в прутках одной партии составляет 9 и 5 м/с соответственно. Изменения скорости стержневых и крутильных волн в прутках разных плавок составили 11 и 8 м/с.

Изменения скорости поперечной волны по диаметру прутка составили 14 м/с, что превышает отклонения по скорости крутильных и стержневых волн 8 и 11 м/с.

Влияние колебаний диаметра на результаты измерения скорости в пределах квалитета от h9–0,062 мм до h12–0,25 мм в минусовую сторону составляет 14 м/с, что дает основание считать превалирующей роль этого фактора при объяснении значительного разброса от 2 до 6 м/с в оценке скорости волн.

Список литературы

1. *Муравьев, В. В.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 66–70.

2. 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. 3–12.

3. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

4. *Злобин, Д. В.* Особенности построения аппаратуры электромагнитно-акустической дефектоскопии пруткового проката с использованием стержневых волн / Д. В. Злобин, О. В. Муравьева // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2012. – № 4 (56). – С. 99–104.

5. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

6. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнито-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

7. *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.

8. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 57–66.

9. *Муравьева, О. В.* Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, С. А. Мурашов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 2 (50). – С. 149–154.

10. 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.

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

12. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.

O. V. Muraveva, DSc in engineering, professor
V. V. Muravev, DSc in engineering, professor, head of department
M. A. Sintsov, head of laboratory
V. S. Strelkov, A. E. Shklyaev, magister students
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Influence of Different Melting Factor on Acoustic Wave Velocities in the Bar Stock Production

Velocities of rod and torsional waves in rolled bars within a single or different batches are investigated. The values of anisotropy have been obtained in accordance with results for variation of shear wave velocities along the rod diameter by multiple reflections and of torsional wave velocities. The range for variation of investigated waves in rods of a single batch is up to 9 m/s. The number of main factors influencing the measured parameters involve internal stresses obtained at rolling and planishing, the structural non-homogeneity along the rod length after heat treatment, zone segregation in chemical composition and

variations of diameters along the rod length. These factors determine anisotropy and variety of measured parameters both within a single batch and for different batches.

Keywords: ultrasonic wave velocity, electromagnetic acoustic method, chemical composition of steel.

УДК 620.179.16+534.22

Ю. В. Мышкин, ст. преподаватель
E-mail: mubm@yandex.ru
В. С. Стрелков, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Моделирование распространения крутильной и стержневой волны в прутке с дефектами*

Представлены результаты моделирования взаимодействия крутильной и стержневой волны с дефектами в виде сегментного паза и газовой поры, вытянутой вдоль прутка, на частоте 25 кГц в прутке диаметром 17 мм. Получены зависимости коэффициента отражения от глубины сегментного паза и координаты газовой поры по радиусу прутка. Приведена зависимость отношения коэффициентов отражения стержневой и крутильной волны от размера и координаты дефектов.

Ключевые слова: крутильная волна, стержневая волна, пруток, коэффициент отражения, поперечное сечение прутка.

Введение

Современные направления в неразрушающем контроле плавно перемещаются из области дефектоскопии в область дефектометрии, когда основным приоритетом является идентификация типа дефекта, его размера и координат [1]. При классическом ультразвуковом методе определение координат дефекта производится эхо-импульсным методом на основании времени прохождения акустической волны до дефекта и обратно [2]. Размеры и тип дефекта могут быть определены с использованием эхо-зеркального, зеркально-теневого, дельта-, дифракционно-временного, спектрального методов [2]. Подходы по оп-

© Мышкин Ю. В., Стрелков В. С., 2018
*Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

ределению координат несплошностей в объекте контроля при дефектометрии могут быть улучшены за счет использования активной и синтетической фокусировки [1, 3–9].

Акустический волноводный метод позволяет определить координату дефекта по длине линейно-протяженного объекта контроля [10–14], а с использованием фокусировки – по огибающей линии профиля поперечного сечения, в частности, по периметру труб большого диаметра [15–20]. Точность определения координаты зависит от типа используемой моды волны, частоты, на которой она возбуждается, и параметров возбуждения. Координата дефекта относительно цилиндрической поверхности трубы или прутка производится с помощью дополнительных методов контроля, например, классическими ультразвуковыми методами, рассмотренными выше.

Одним из самых распространенных цилиндрических линейно-протяженных объектов в металлургической промышленности является пруток. Прутки на выходе из производства могут иметь дефекты типа трещины, флокены, волосовины, закатов, раковин, плен, растянутые газовые поры, неметаллические включения и т. п. В процессе транспортировки и эксплуатации могут появляться и накапливаться остаточные напряжения и механические повреждения в виде вмятин, царапин, забоин, утяжин и т. п. [21–25].

При обнаружении дефектов волноводным методом применяют подтверждающий метод контроля, например классический ультразвуковой метод. Одним из используемых и перспективных методов является зеркально-теневой метод, основанный на методе многократных отражений, при котором может использоваться электромагнитно-акустический преобразователь [26]. Но, несмотря на все достоинства метода, определение координат и размеров дефекта с его помощью является нерешенной задачей.

В работе представлены результаты моделирования взаимодействия крутильной и стержневой волны с дефектом в виде сегментного паза различной глубины и газовой поры, вытянутой вдоль прутка, на частоте 25 кГц.

Используемые подходы

Модель для исследования взаимодействия крутильной и стержневой волны с дефектами состояла из прутка диаметром 17 мм длиной 2,3 м с дефектом на расстоянии 1,6 м и областью прикладывания силы для генерации акустического импульса. Используемая форма импульса приведена в [12]. Материал прутка – углеродистая сталь со сле-

дующими упругими и физическими параметрами: плотность ρ = 7810 кг/м^3, модуль Юнга E = 211 ГПа, коэффициент Пуассона μ = 0,281. В качестве исследуемых типов дефектов использовался сегментный паз (рис. 1, *а*) и газовая пора диаметром 1 мм (рис. 1, *б*), вытянутая в процессе проката.

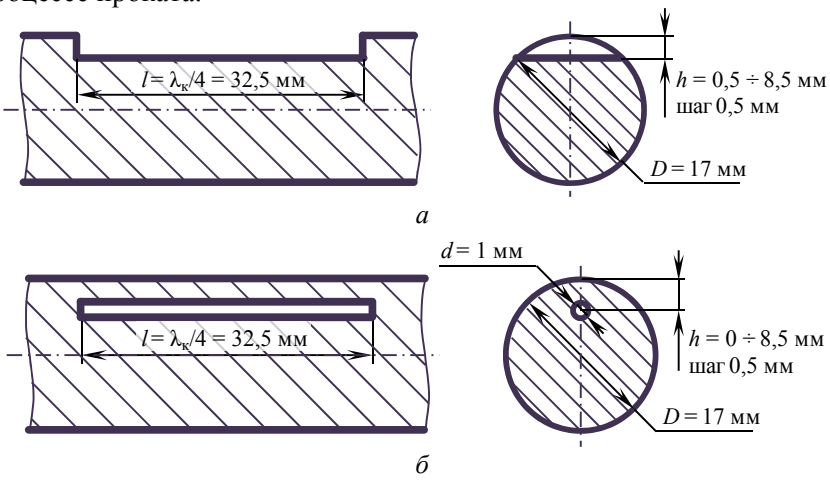


Рис. 1. Моделируемые типы дефектов: сегментный паз (*а*), газовая пора, вытянутая в процессе проката (*б*)

При моделировании сегментного паза изменялась глубина паза с 0,5 до 8,5 мм. При моделировании газовой поры изменялось положение относительно поверхности прутка с 0 до 8,5 мм. Протяженность исследуемых дефектов составляла четверть длины крутильной волны.

Для оценки полученных результатов снималась эхограмма в виде упругих смещений в заданной точке пространства. При моделировании распространения крутильной волны в качестве последней использовалась точка на цилиндрической поверхности прутка на расстоянии четверти длины волны от торца, при моделировании распространения стержневой волны – точка в центре торца.

По полученным эхограммам оценивался коэффициент отражения от дефекта и изменение амплитуды сигнала от дефекта и противоположного торца (донной поверхности). Коэффициент отражения определялся как отношение амлитуды сигнала от дефекта $A_{\text{деф}}$ к амплитуде донного сигнала $A_{\text{дон}}$:

$$R = \frac{A_{\text{деф}}}{A_{\text{дон}}}. \quad (1)$$

При исследовании влияния размеров сегментного паза главным критерием оценки коэффициента отражения было изменение относительной площади поперечного сечения дефекта. При исследовании влияния глубины залегания газовой поры по радиусу прутка главным критерием оценки коэффициента отражения было изменение координаты дефекта по радиусу прутка относительно цилиндрической поверхности.

Результаты и обсуждение

По результатам моделирования в зависимости от глубины дефекта строились серии эхограмм (рис.2), оценивалась амплитуда сигнала от дефекта по его размаху и сравнивалась с амплитудой донного сигнала, также определяемой по размаху. На приведенных эхограммах (рис. 2) с увеличением глубины дефекта наблюдается увеличение амплитуды сигнала от дефекта и изменение формы импульса. В частности, для крутильной волны наблюдается сильное уменьшение амплитуды донного импульса (в 2,5 раза) при увеличении глубины дефекта с 0,5 мм до 8,5 мм, при этом амплитуда сигнала от дефекта увеличивается в 20 раз.

Размер дефекта в виде сегментного паза относительно размеров прутка можно охарактеризовать относительной площадью поперечного сечения $S_{\text{деф}}$ (ППС), выраженной в процентах. На рис. 3 представлены зависимости относительной амплитуды эхосигнала от дефекта $A^{\text{отн}}_{\text{деф}}$, амплитуды донного сигнала $A^{\text{отн}}_{\text{дон}}$ и коэффициента отражения R от относительной площади поперечного сечения дефекта $S_{\text{деф}}$ для стержневой и крутильной волны.

Для зависимости коэффициента отражения стержневой волны от ППС дефекта наблюдается экспоненциальная зависимость (рис. 3, *а*) в области от 0 до 20 %, которая далее переходит в линейную зависимость. Аналогичная зависимость наблюдается для относительной амплитуды сигнала от дефекта. На участке ППС дефекта от 10 до 20 % наблюдаются минимальные значения относительной амплитуды донного сигнала $A^{\text{отн}}_{\text{дон}} = 0{,}85$, максимальное значение $A^{\text{отн}}_{\text{дон}} = 1$ достигает при $S_{\text{деф}} = 46{,}2$ %.

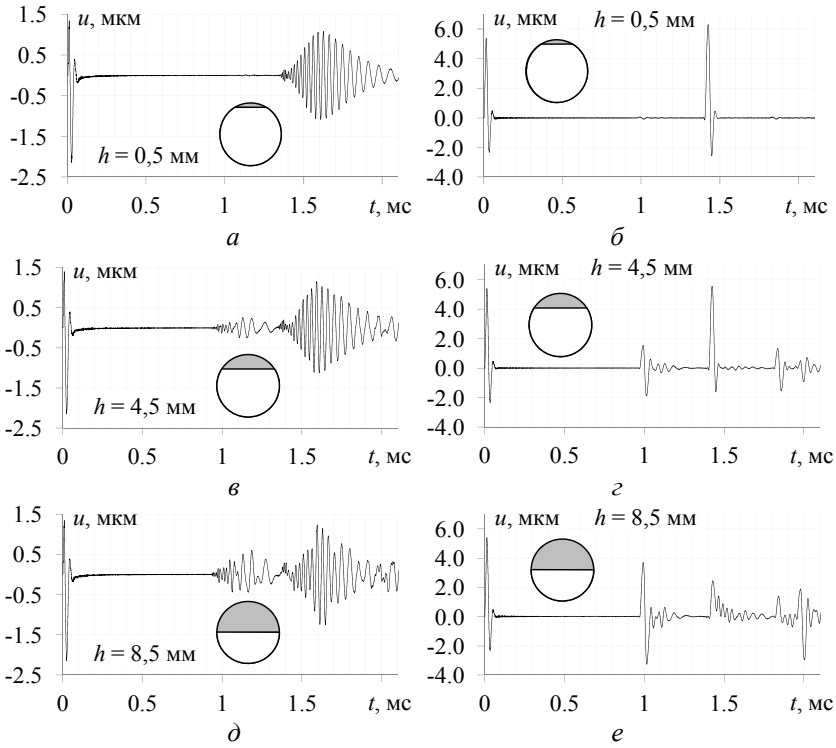
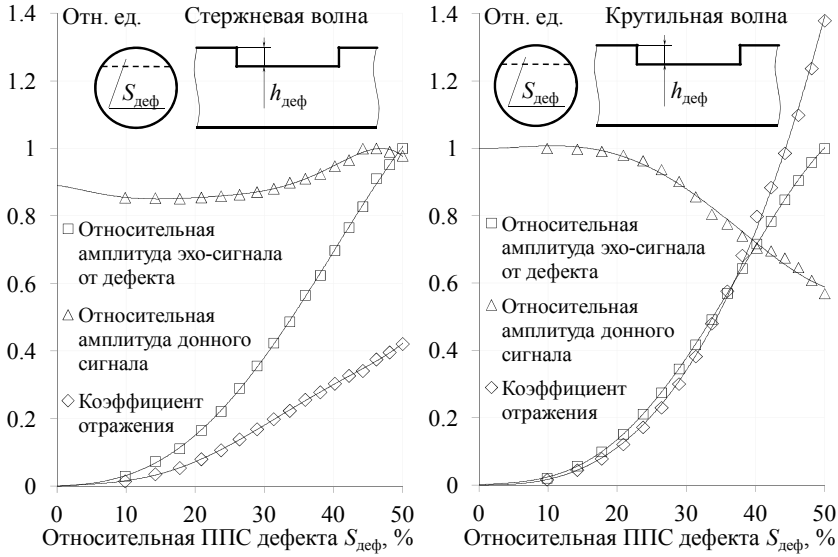


Рис. 2. Эхограммы стержневой (*а*, *в*, *д*) и крутильной (*б*, *г*, *е*) волны, полученные по результатам моделирования ее распространения в прутке диаметром D = 17 мм, при различной глубине сегментного паза: h = 0,5 мм (*а*, *б*), h = 4,5 мм (*в*, *г*), h = 8,5 мм (*д*, *е*)

На всем участке кривой (рис. 3, *б*) коэффициента отражения стержневой волны от дефекта (при относительной ППС дефекта от 0 до 50 %) наблюдается равномерная растущая экспоненциальная зависимость до значения R = 1,38 при $S_{\text{деф}}$ = 50 %. При этом относительная амплитуда от дефекта $A_{\text{деф}}^{\text{отн}}$ имеет аналогичную зависимость до $S_{\text{деф}}$ = 30 %, переходящую далее в убывающую логарифмическую зависимость, а относительная амплитуда донного сигнала $A_{\text{дон}}^{\text{отн}}$ имеет плавную затухующую кривую на участке ППС дефекта от 0 до 30 %, переходящую в линейную зависимость. Минимальное значение относительная амплитуда донного сигнала $A_{\text{дон}}^{\text{отн}}$ = 0,57 достигает при $S_{\text{деф}}$ = 50 %.

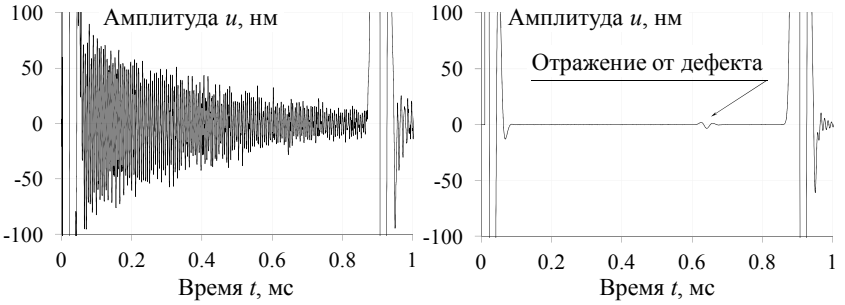


а *б*

Рис. 3. Зависимости относительной амплитуды эхосигнала от дефекта, амплитуды донного сигнала и коэффициента отражения от относительной площади поперечного сечения дефекта $S_{деф}$ для стержневой (*а*) и крутильной (*б*) волны

Распространение акустической волны в прутке с дефектом в виде газовой поры, вытянутой вдоль прутка, анализировалось в зависимости от глубины залегания дефекта. Площадь поперечного сечения исследуемой газовой поры на глубине h от 0,5 до 8,5 мм имела постоянное значение 0,78 мм^2, что соответствует ППС $S_{деф}$ = 0,35 %. При выходе поры на поверхность (h = 0 мм) площадь дефекта уменьшалась до 0,39 мм^2 (ППС $S_{деф}$ = 0,17 %).

При исследовании взаимодействия акустической волны с дефектом в виде газовой поры, протяженной вдоль прутка, на исследуемом участке полученных эхограмм наблюдались высокочастотные акустические шумы (рис. 4, *а*) по амплитуде, превышающие сигнал от дефекта. Для выделения полезного сигнала применялся нерекурсивный фильтр низких частот с частотой среза 80 кГц. Обработка сигналов проводилась в программной среде WinПОС, пример выполнения которой приведен на рис. 4, *б*. После применения фильтра наблюдался четкий сигнал от дефекта, амплитуда которого меньше амплитуды акустических шумов в 8,9 раз.



а *б*

Рис. 4. Эхограммы стержневой волны без фильтрации (*а*) и с применением нерекурсивного фильтра низких частот (*б*)

На обработанных осциллограммах фильтром низких частот оценивался коэффициент отражения крутильной и стержневой волны, зависимости которых от глубины дефекта по радиусу прутка приведены на рис. 5. Для стержневой волны наблюдается линейная зависимость, при этом на любой глубине залегания дефекта значение коэффициента отражения R практически не изменялось и равнялось 0,0025. Коэффициент отражения крутильной волны, максимум которого $R_К$ = 0,0072 наблюдается при h = 0,5 мм, с увеличением глубины залегания дефекта нелинейно убывал, при этом характер изменения коэффициента отражения хорошо аппроксимируется логарифмической кривой.

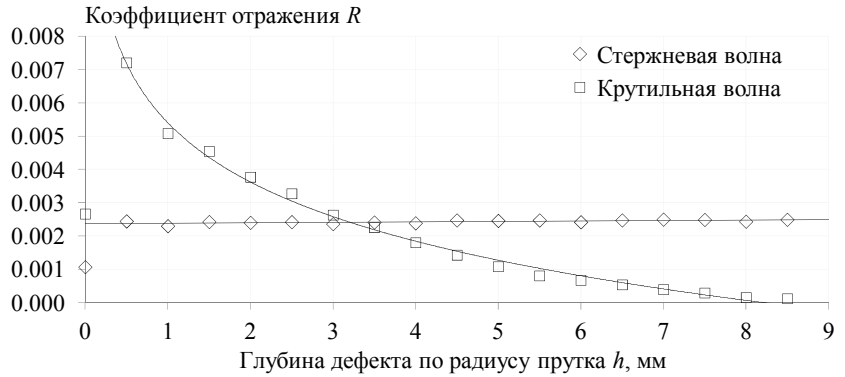


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения крутильной $R_К$ и стержневой $R_С$ волны от глубины дефекта по радиусу прутка h

Обе зависимости коэффициента отражения (рис. 5) имеют резкий спад при h = 0 мм до значений $R_К$ = 0,0027 для крутильной волны и $R_С$ = 0,0011 для стержневой волны, который объясняется уменьшением площади поперечного сечения дефекта.

Из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что размеры, такие как площадь поперечного сечения, и координату дефекта по радиусу прутка можно определять с помощью отношения коэффициентов отражения стержневой и крутильной волны.

Выводы

Таким образом, по результатам моделирования взаимодействия крутильной и стержневой волны с дефектами в прутке диаметром 17 мм можно сделать следующие выводы:

– при увеличении площади поперечного сечения дефекта в пределах от 0 до 50 % амплитуда донного импульса крутильной волны уменьшается в 1,75 раз, стержневой волны – увеличивается в 1,17 раз;

– коэффициент отражения стержневой волны от дефекта имеет линейную зависимость на участке от 20 до 50 % от площади поперечного сечения дефекта и достигает максимального значения 0,42;

– коэффициент отражения стержневой волны от дефекта имеет растущую экспоненциальную зависимость на всем исследуемом участке от площади поперечного сечения дефекта и достигает максимального значения 1,38;

– оценку размеров дефекта по радиусу прутка, как функцию от его площади поперечного сечения, можно проводить по известным зависимостям отношения коэффициентов отражения стержневой и крутильной волны от относительной площади дефекта.

Результаты моделирования могут быть использованы при создании методик определения размеров и координат дефектов при волноводном контроле прутков.

Список литературы

1. *Вопилкин, А. Х.* Современные автоматизированные средства и методы ультразвукового контроля сварных соединений оборудования и трубопроводов реакторных установок типа ВВЭР / А. Х. Вопилкин , Д. С. Тихонов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (19–20 сент. 2017 г.). – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 74–86. – URL: http://e.biblio.bru.by/handle/1212121212/4974 (дата обращения: 11.11.2017).

2. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. – Т. 3: Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М. : Машиностроение ; Спектр. – 2008. – 864 с.

3. *Muraveva, O. V.* Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic–acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors/ O. V. Muraveva, V. V. Muravev, Y. V. Myshkin // NDT & E International. – 2018. – Vol. 93. – Pp. 40–56. – Doi: 10.1016/j.ndteint.2017.09.009.

4. *Bazulin, E. G.* Ultrasonic testing on a singly reflected beam using sparse antenna arrays and 3D echo-signal processing // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52, no. 1. – Pp. 1–13.

5. *Murav'eva, O. V.* Simulation of acoustic fields of synphase electromagnetic-acoustic transducers / O. V. Murav'eva, A. V. Myshkin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2013. – Vol. 49, no. 12. – Pp. 728–734.

6. *Murav'eva, O. V.* The influence of the design features of antiphased electromagnetic-acoustic transducers on the formation of directivity characteristics / O. V. Murav'eva , V. V. Murav'ev , A. V. Myshkin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, no. 9. – Pp. 531–538.

7. *Danilov, V. N.* On the influence of certain factors on the characteristics of a signal from a normal linear phased-array transducer in the transmission mode / *V. N. Danilov , I. V. Voronkov* // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47, no. 6. – Pp. 381–392.

8. Olympus N. D. T. Advances in phased array ultrasonic technology applications // Olympus NDT. – 2007. – Vol. 48. – URL: https://www.olympus-ims.com/en/books/pa/pa-advances/ (registration, access date: January 31, 2018).

9. Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в COMSOL Multiphysics / К. В. Петров , Г. Л. Пушина , А. Ф. Башарова , В. С. Стрелков // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 292–298.

10. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева , С. В. Леньков , С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – № 1. – С. 117–124.

11. Муравьева, О. В. Использование крутильных волн при выявлении эксплуатационных дефектов насосных штанг и насосно-компрессорных труб / О. В. Муравьева, С. А. Мурашов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2011. – № 2. – С. 149–154.

12. *Murav'eva, O. V.* Estimation of the sensitivity of acoustic reflectometry to flaws in heat-exchange pipes / O. V. Murav'eva , V. A. Strizhak , A. V. Pryakhin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2017. – Vol. 53, no. 3. – Pp. 190–197.

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

14. Акустический волноводный контроль 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.

15. Phased-array focusing with longitudinal guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder / W. Luo, J. L. Rose, J. K. Van Velsor, J. Mu // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 820, no. 1. – Pp. 869–876.

16. Analysis of flexural mode focusing by a semianalytical finite element method / T. Hayashi, K. Kawashima, Z. Sun, J. L. Rose // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – Vol. 113, no. 3. – Pp. 1241–1248.

17. Defect sizing in pipe using an ultrasonic guided wave focusing technique / J. Mu, L. Zhang, J. L. Rose, J. Spanner // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 820, no. 1. – Pp. 760–766.

18. Hybrid active focusing with adaptive dispersion for higher defect sensitivity in guided wave inspection of cylindrical structures / P. S. Lowe, R. Sanderson, N. V. Boulgouris, T. H. Gan // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 31, no. 3. – Pp. 219–234.

19. *Davies, J.* The application of synthetic focusing for imaging crack-like defects in pipelines using guided waves / J. Davies, P. Cawley // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2009. – Vol. 56, no. 4. – Pp. 759–771.

20. Detection of axial cracks in pipes using focused guided waves / S. Fletcher, M. J. S. Lowe, M. Ratassepp, C. Brett // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2012. – Vol. 31, no. 1. – Pp. 56–64.

21. Опыт приемочного акустического контроля и упрочнения насосных штанг при сервисном обслуживании / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Н. А. Кокорин, В. А. Стрижак // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – № 4. – С. 14–19.

22.. Electromagnetic-acoustic structural analysis of rolled bars / O. V. Muravieva, V. V. Muraviev, M. A. Gabbasova, K. V. Petrov, V. A Zorin // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1785, no. 1. – P. 030017.

23. *Шаврин, О. И.* Влияние термодеформационной обработкина субструктуру и прочностные характеристики пружинных сталей / О. И. Шаврин, Л. Н. Маслов, Л. Л. Лукин // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11, № 3-4. – С. 56–61.

24. *Буденков, Г. А.* Стандартные образцы для акустической дефектоскопии прутков малых диаметров из инструментальной стали / Г. А. Буденков, О.В. Недзвецкая, Т.Н. Лебедева // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 25–29.

25. 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.

26. Possibilities of the mirror through transmission electromagnetic-acoustic technique on multiple reflections / K. V. Petrov, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova, V. A. Zorin // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881, no. 1. – P. 012018.

27. *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.

28. Взаимодействие крутильных волн с продольными трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. – 2006. – № 6. – С. 57–66.

29. *Мышкин, Ю. В*. Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю. В. Мышкин, К. В. Петров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (19–20 сент. 2017 г.). – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 519–529.

Yu. V. Myshkin, senior lecturer
E-mail: mubm@yandex.ru
V. S. Strelkov, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Modeling of Torsional and Rod Waves Propagation in Bar with Defects

The results of modeling the interaction of torsional and rod waves with defects in the form of a segment groove and a gas pore elongated along a rod at a frequency of 25 kHz in a rod with a diameter of 17 mm are presented. Dependences of the reflection coefficient on the depth of the segment groove and the coordinates of the gas pore along the radius of the rod are obtained. The dependence of the ratio of the reflection coefficients of the rod and torsional waves on the size and the coordinate of the defects is given.

Keywords: torsional wave, rod wave, bar, reflection coefficient, cross-section of bar.

УДК 620.19+534.231

Ю. В. Мышкин, ст. преподаватель
E-mail: mubm@yandex.ru
А. А. Фотина, магистрант
Ю. О. Кощеева, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

Моделирование угловой фокусировки в трубе большого диаметра*

В статье приведены результаты моделирования угловой фокусировки крутильной волны в трубе диаметром 1420 мм. Получены зависимости акустического фокуса, относительной амплитуды смещений, протяженности фокусного пятна от угла отклонения от нормали к плоскости апертуры преобразователя на частотах 20 и 30 кГц.

Ключевые слова: волноводный акустичесий метод контроля, фокусировка, фокусное пятно, трубопровод, крутильная волна.

Введение

Своевременный контроль и диагностика позволяют избегать недопустимых дефектов в нефте- и газопроводах. На сегодняшний день контроль протяженных объектов осуществляется с помощью ультразвуковых, акустико-эмиссионных, магнитных и вихретоковых методов неразрушающего контроля (НК) [1, 2]. В частности, одним из современных методов является волноводный акустический метод, который основан на использовании направленных волн (Лэмба, tH-, Похгаммера) [2–7]. Основными достоинствами метода являются возможность экспресс-диагностики протяженных объектов (экспресс-диагностика проводится при локальном доступе к объекту) и высокая производительность контроля, которая увеличивается за счет отсутствия сканирования [7–9].

Для повышения чувствительности к обнаружению дефекта при волноводном методе используют фокусировку ультразвуковых волн [11], при этом чувствительность может возрасти в 4 и более раз [12–15].

© Мышкин Ю. В., Фотина А. А., Кощеева Ю. О., 2018
*Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

Фокусировка в трубах большого диаметра достигается за счет формирования фокусного пятна с использованием мод продольной (*L*) или крутильной (*T*) волны. Чаще всего при исследованиях фокусировки используются трубы типоразмера: внешний диаметр до 410 мм, длина до 8 м, толщина стенки до 10 мм [13–19]. При этом параметры возбуждения характеризуются: частотой в диапазоне 20–800 кГц [1, 7, 10, 11, 13–25], из которого чаще всего используется для крутильной волны частота 20–50 кГц и продольной волны 60–80 кГц; формой зондирующего импульса в виде окна Ханнинга с пятью и более периодами [11–18]. В качестве программной среды для моделирования фокусировки и обработки полученных результатов в основном применяется программа Abaqus [12–14, 22, 25].

Впервые (2001) методику активной фокусировки в трубе большого диаметра на практике применили Ч. Ли и Дж. Л. Роуз [11], добившись фокуса в выбранной точке по периметру трубы с помощью решетки преобразователей. На трубу длиной 8,3 м с внешним диаметром 406,4 мм и толщиной стенки 9,53 мм устанавливалось кольцо с 44 ЭМА-преобразователями. Возбуждались волны любой из представленных мод: крутильные T(0,1), продольные L(0,2), изгибные F(10,1). Частота генерируемого сигнала устанавливалась в диапазоне от 30 до 150 кГц.

В статье представлено моделирование активной фокусировки под углом относительно нормали к плоскости апертуры фазированной решетки в трубе диаметром 1420 мм на частоте 20 и 30 кГц.

Используемые подходы

Модель формирования акустического поля ФР t_H-волн в трубе включает в себя антенную фазированную решетку, накладываемую на плоскую поверхность в виде развертки трубы, имеющей области основных вычислений *MC* и бесконечного пространства *ID*, и аналогична описанной в работе [26]. В модели использованы граничные условия, позволяющие представить развертку трубы на плоскости путем равенства смещений на боковых гранях $U_1 = U_2$. Антенная фазированная решетка, состоящая из пьезоэлектрических преобразователей с линейными контактами длиной *DP* и толщиной *DT* и равномерно распределенными по периметру трубы диаметром *D*, формирует фокусное пятно на расстоянии F_g с протяженностью *L* и диаметром 2*R* (рис. 1).

В табл. 1 и 2 представлены свойства материала трубы и входные значения, при этом частота *f* и геометрический фокус F_g являются изменяемыми параметрами.

Таблица 1. **Свойства материала трубы**

Параметр	Численное значение	Единица измерения
Коэффициент Юнга, E	$212 \cdot 10^9$	Па
Коэффициент Пуассона, η	0,291	–
Скорость распространения, C	3242,4	м/с
Плотность материала, ρ	7810	кг/м^3

Таблица 2. **Входные параметры**

Параметры	Численное значение	Единица измерения
Диаметр трубы, D	1,42	м
Апертуры трубы, πD	4,461	м
Количество конечных элементов, N	112763	-
Угол отклонения от нормали, α	0–50	º
Частота, f	20; 30	кГц
Период, $T0$	$5 \cdot 10^{-6}$	с
Геометрический фокус, Fg	2,6; 2,5	м
Длина одного полоскового преобразователя, DP	0,01	м
Толщина одного полоскового преобразователя, DT	0,001	м

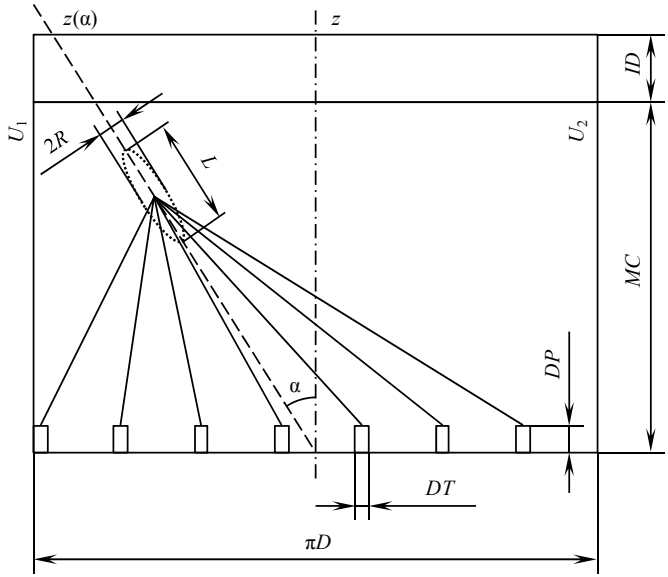


Рис. 1. Постановка задачи расчета акустического поля в виде развертки трубы при фокусировке под углом к нормали к плоскости апертуры

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 изображена зависимость амплитуды смещений *tH*-волны при различных углах фокусировки в трубе диаметром 1420 мм на частоте 30 кГц. Из графиков видно, что расстояние акустического фокуса $F_a \approx 2{,}6$ м не соотвествует геометрическому $F_g = 2{,}5$ м, амплитуда смещений с увеличением угла фокусировки уменьшается, а протяженность фокусного пятна уменьшается.

На рис. 3 представлены зависимости акустического фокуса от угла отклонения от нормали плоскости апертуры на частотах 20 и 30 кГц. Из рисунков видно, что графики имеют линейную зависимость с разбросом в 0,08 м на частоте 20 кГц и 0,05 м на частоте 30 кГц. Разница геометрического фокуса и акустического на частотах 20 и 30 кГц составляет 0,13 м и 0,09 м соответственно.

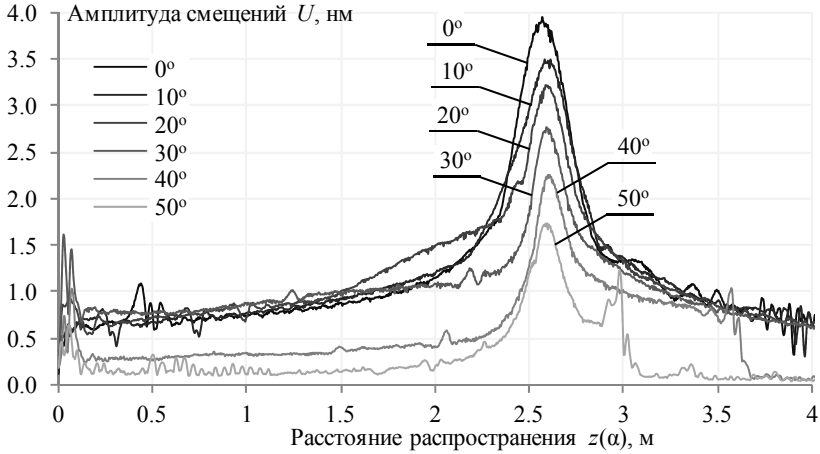


Рис. 2. Зависимость амплитуды смещений *tH*-волны в трубе диаметром $D = 1420$ мм от расстояния ее распространения при различных углах фокусировки от нормали к плоскости апертуры на частоте $f = 30$ кГц

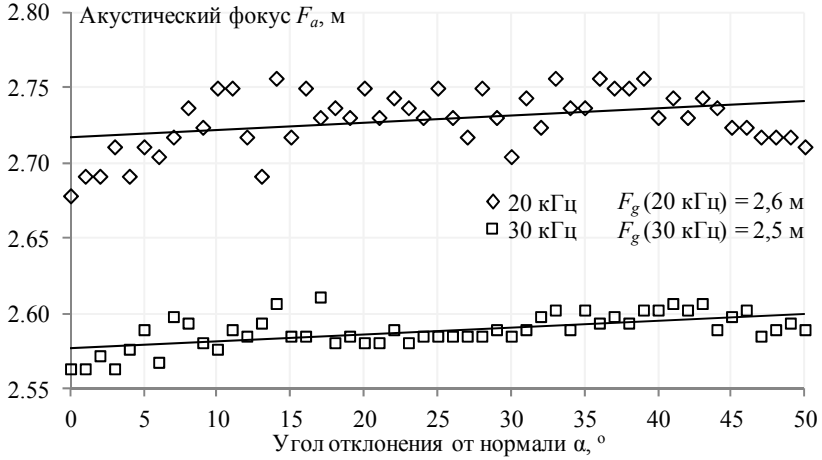


Рис. 3. Зависимость акустического фокуса от угла отклонения от нормали к плоскости апертуры α на частоте 20 и 30 кГц

На рис. 4 представлены зависимости относительной амплитуды от угла отклонения от нормали плоскости апертуры на частотах 20 и 30 кГц. Относительная амплитуда расчитывается по формуле

$$A = \frac{U_\alpha}{U_0},$$

где U_0 – амплитуда смещения t_H-волны в точке фокуса при нормальной фокусировке, U_α – амплитуда смещения в точке фокуса при различных углах отклонения от нормали α.

Из рисунков видно, что графики имеют нелинейные убывающие зависимости, при этом максимальная амплитуда соответствует минимальному углу отклонения от нормали α. Например, при угле отклонения равном 10º и 40º относительная амплитуда равна 0,91 и 0,52 на частоте 20 кГц и 0,89 и 0,57 на частоте 30 кГц.

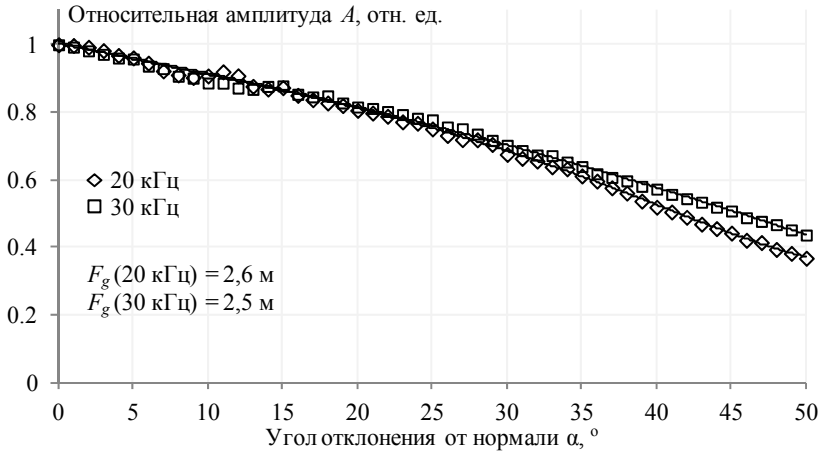


Рис. 4. Зависимость амплитуды смещений t_H-волны в точке фокуса от угла отклонения от нормали к плоскости апертуры α на частотах 20 и 30 кГц

Зависимости протяженности фокусного пятна L от угла фокусировки от нормали к плоскости апертуры α представлены на рис. 5 на частотах 20 и 30 кГц.

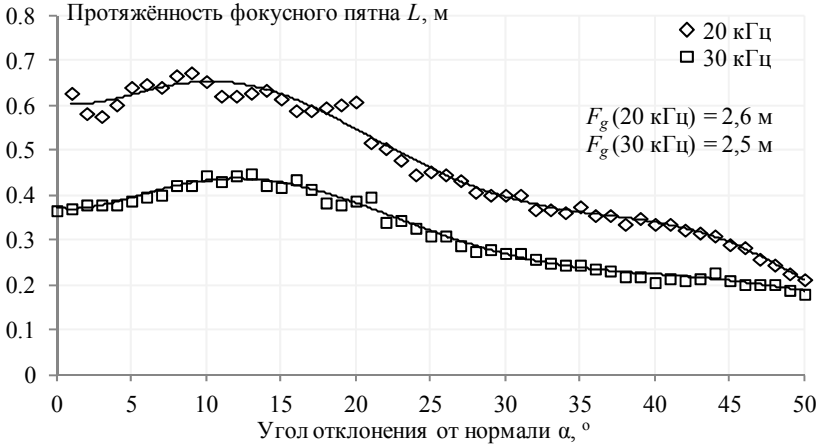


Рис. 5. Зависимость протяженности фокусного пятна L от угла отклонения от нормали к плоскости апертуры α на частотах 20 и 30 кГц

Графики имеют нелинейную зависимость с одним экстремумом. Так, максимальная протяженность фокусного пятна L наблюдается при углах отклонения α от 8º до 15º, а минимальная на 50º в исследуемом диапазоне углов. Например, при углах отклонения 13º и 50º протяженность фокусного пятна L равна 0,63 м и 0,21 м на частоте 20 кГц и 0,45 м и 0,18 м – на частоте 30 кГц.

Выводы

По результатам моделирования угловой фокусировки в трубе диаметром 530 мм можно сделать следующие выводы:

– с увеличением угла фокусировки до 50 градусов акустический фокус имеет несущественные изменения с разбросом по значению в пределах 2,9 и 1,9 % на частоте 20 и 30 кГц соответственно, при этом амплитуда в точке фокуса плавно уменьшается в 2,7 и 2,3 раза соответственно;

– при увеличении угла фокусировки до 10 градусов на частоте 20 и 30 кГц протяженность фокусного увеличивается в 1,17 и 1,21 раза соответственно, при дальнейшем увеличении угла до 50 градусов – уменьшается в 2,48 и 3,13 раза соответственно;

– разрешающая способность при угловой фокусировке относительно прямой фокусировки может быть улучшена при углах более 20 градусов.

Результаты исследования могут быть использованы при создании методик волноводного контроля с применением угловой фокусировки, а также при проектировании акустических низкочастотных преобразователей и систем фазированной решетки на их основе.

Список литературы

1. Acoustic guided wave testing of pipes of small diameters / V. V. Muravev, O. V. Muraveva, V. A. Strizhak, Y. V. Myshkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 253, no. 1. – P. 012001.

2. Комплексная технология дефектоскопии и упрочнения насосных штанг Г. А. Буденков, О. И. Шаврин, О. И. Недзвецкая, Н. А. Кокорин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2002. – № 3. – С. 16–18.

3. 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.

4. 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.

5. *Муравьева, О. В.* Крутильные волны, возбуждаемые электромагнитно-акустическими преобразователями, при акустическом волноводном контроле трубопроводов / О. В. Муравьева, С. В. Леньков, С. А. Мурашов // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 1. – С. 117–124.

6. *Муравьева, О. В.* Оценка чувствительности метода акустической рефлектометрии к дефектам теплообменных труб / О. В. Муравьева, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин // Дефектоскопия. – 2017. – №. 3. – С. 27–34.

7. *Clough, M.* Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound / M. Clough, M. Fleming, S. Dixon // NDT & E International. – 2017. – Vol. 86. – Pp. 20–27.

8. 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. 14–18.

9. Комплексная технология дефектоскопии и упрочнения насосных штанг / Г. А. Буденков и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2002. – № 3. – С. 16–18.

10. *Myshkin, Y. V.* The features of the guided wave excitation and propagation at testing of pipes / Y. V. Myshkin, O. V. Muravieva // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 881, no. 1. – P. 012019.

11. *Li, J.* Implementing guided wave mode control by use of a phased transducer array / J. Li, J. L. Rose // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2001. – Vol. 48, no. 3. – Pp. 761–768.

12. *Davies, J.* Long range guided wave pipe inspection–the advantages of focusing / J. Davies, P. Cawley, M. Lowe // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China. – 2008. – 6 p. – URL: http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/95.pdf (accessed date: January 31, 2018).

13. Detection of axial cracks in pipes using focused guided waves / S. Fletcher, M. J. S. Lowe, M. Ratassepp, C. Brett // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2012. – Vol. 31, no. 1. – Pp. 56–64.

14. *Davies, J.* The application of synthetic focusing for imaging crack-like defects in pipelines using guided waves / J. Davies, P. Cawley // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2009. – Vol. 56, no. 4. – Pp. 759–771.

15. Defect sizing in pipe using an ultrasonic guided wave focusing technique / J. Mu, L. Zhang, J. L. Rose, J. Spanner // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 820, no. 1. – Pp. 760–766.

16. Analysis of flexural mode focusing by a semianalytical finite element method / T. Hayashi, K. Kawashima, Z. Sun, J. L. Rose // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2003. – Vol. 113, no. 3. – Pp. 1241–1248.

17. *Zhang, L.* High frequency guided wave natural focusing pipe inspection with frequency and angle tuning / L. Zhang, B. J. Gavigan, J. L. Rose // Journal of pressure vessel technology. – 2006. – Vol. 3. – No. 3. – Pp. 433–438.

18. Phased-array focusing with longitudinal guided waves in a viscoelastic coated hollow cylinder / W. Luo, J. L. Rose, J. K. Van Velsor, J. Mu // AIP Conference Proceedings. – 2006. – Vol. 820, no. 1. – Pp. 869–876.

19. *Mu, J.* Defect circumferential sizing by using long range ultrasonic guided wave focusing techniques in pipe / J. Mu, L. Zhang, J. L. Rose // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2007. – Vol. 22, no. 4. – Pp. 239–253.

20. *Mu, J.* Long range ultrasonic guided wave focusing in pipe using a phased-array system / J. Mu, J. L. Rose // AIP Conference Proceedings. – 2007. – Vol. 894, no. 1. – Pp. 158–162.

21. *Davies, J.* The application of synthetically focused imaging techniques for high resolution guided wave pipe inspection / J. Davies, P. Cawley // AIP Conference Proceedings. – 2007. – Vol. 894, no. 1. – Pp. 681–688.

22. Hybrid active focusing with adaptive dispersion for higher defect sensitivity in guided wave inspection of cylindrical structures / Lowe P. S. et al. // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 31, no. 3. – Pp. 219–234.

23. *Moles, M.* Advances in phased array ultrasonic technology applications. R/D tech guideline. Olympus NDT; 2007. – URL: http://www.olympus-ims.com/en/.downloads/download/?file=285213003&fl=en_US (registration, access date: November 2, 2016).

24. *Velichko, A.* Guided wave arrays for high resolution inspection / A. Velichko, P. D. Wilcox // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2008. – Vol. 123, no. 1. – Pp. 186–196.

25. *Ratassepp, M.* Axial defect imaging in a pipe using synthetically focused guided waves / M. Ratassepp, S. Fletcher, A. Klauson // Est. J. Eng. – 2011. – Vol. 17, no. 1. – Pp. 66–75.

26. *Мышкин, Ю. В*. Влияние количества элементов в фазированной решётке на эффективность фокусировки в трубах большого диаметра / Ю. В. Мышкин, А. А. Фотина, Ю. О. Кощеева // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 276–283.

Yu. V. Myshkin, senior lecturer
E-mail: mubm@yandex.ru
A. A. Fotina, magister student
Yu. O. Koscheeva, student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Angular Focusing Simulation in Large Diameter Pipes

In this article the results of modeling the angular focusing of a torsional wave in a pipe with a diameter of 1420 mm are presented. Dependences of the acoustic focus, the relative amplitude of the displacements, the extent of the focal spot on the deviation angle from the normal to the plane of the converter aperture at frequencies of 20 and 30 kHz are obtained.

Key words: acoustic guided wave testing, focusing, focal spot, pipeline, torsional wave.

УДК 620.179.16

К. В. Петров, аспирант
Г. Л. Федорова, магистрант
А. Ф. Башарова, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование фокусировки акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем*

В работе представлены результаты моделирования фокусировки поперечных акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем. Приведено сравнение с полученными ранее результатами моделирования фокусировки продольных волн. Получены зависимости коэффициента фокусировки от рабочей частоты преобразователя, диаметра прутка и добротности зондирующего импульса. Корректность результатов моделирования подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: моделирование, электромагнитно-акустический преобразователь, эпюра смещений, коэффициент фокусировки, фокусное пятно.

© Петров К. В., Федорова Г. Л., Башарова А. Ф., 2018
*Работа выполнена в рамках проекта № 15-19-00051 Российского научного фонда.

Введение

Исследования акустического поля проходного электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя [1] говорят о наличии неоднородности в распределении смещений по сечению прутка. Локальное увеличение амплитуды смещений, вызванное интерференцией импульсов, излучаемых из различных точек на поверхности прутка, приводит к увеличению чувствительности к дефектам в данной области (зоне фокуса). При контроле прутков зеркально-теневым ЭМА-методом [2–8] с использованием проходных преобразователей возникает необходимость определения факторов, влияющих на формирование зоны фокуса и степени чувствительности к дефектам, расположенным на различной глубине. Для исследования акустических полей используют различные экспериментальные [9–11] и теоретические методы [10, 11], в том числе аналитический расчет и моделирование [12–16]. Ввиду сложности акустических полей, формируемых проходным ЭМА-преобразователем, аналитическое исследование затруднено, а для точного экспериментального исследования необходимо специальное оборудование. В связи с этим для исследования акустических полей проходного ЭМА-преобразователя был использован метод конечно-элементного моделирования. Моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Данная программная среда дает широкие возможности при расчете не только акустических [17–20], но и электромагнитных и магнитных полей [21–27], что позволяет проводить комплексное моделирование ЭМА-преобразователя.

Используемые подходы

Согласно принципу действия проходного ЭМА-преобразователя [28] ультразвуковая волна излучается с поверхности прутка, расположенной непосредственно под катушкой индуктивности, и распространяется вдоль радиальных направлений по сечению. Основные подходы к моделированию распространения акустических волн, излучаемых проходным ЭМА-преобразователем, представлены в работах [1, 12, 29].

Для исследования фокусировки поперечных акустических волн была разработана специальная модель (рис. 1). При моделировании на поверхности прутка формируются начальные смещения $U(t)$ (1), вызывающие появление акустической волны, распространяющейся в радиальных направлениях по сечению прутка.

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t) \mathrm{e}^{-(\beta t)^2}, \qquad (1)$$

где U_0 – амплитуда смещений, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, β – коэффициент затухания.

Для повышения точности расчетов при моделировании был использован критерий Куранта – Фридрихса – Леви, который представляет собой необходимое условие устойчивости явного численного решения дифференциальных уравнений. Основные параметры разработанной модели представлены в таблице.

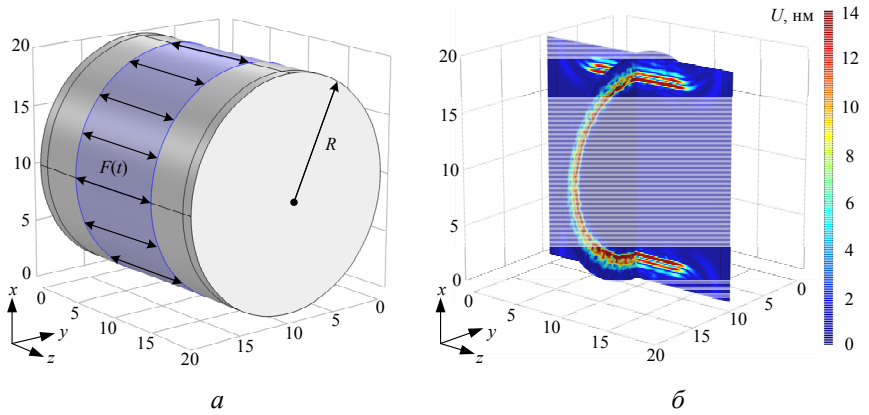


Рис. 1. Разработанная трехмерная модель (*а*), распределение смещений в акустической волне (*б*)

Основные параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Плотность	ρ	7810	кг/м^3
Количество элементов сетки	N	8 155 831	-
Время расчета модели	T	15	час
Модуль Юнга	E	212x10^9	Па
Коэффициент Пуассона	μ	0,291	-
Амплитуда смещений	U_0	30	нм
Коэффициент затухания	β	1; 1,7; 3,3	1/с
Радиус прутка	R	10; 20	мм
Длина объекта	z	15	мм
Рабочая частота преобразователя	f	1; 3	МГц
Скорость волны в материале	C	3242,4	м/с

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования акустического поля проходного ЭМА-преобразователя поперечных волн показывают о наличии локального увеличения амплитуды смещений (фокусировки) в центральной области прутка. Коэффициентом фокусировки принято отношение максимальной амплитуды смещений в зоне фокуса U_{max} к минимальной амплитуде U_{mim}, эквивалентной амплитуде начальных смещений U_0.

$$K_{\text{ф}} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \qquad (2)$$

При моделировании была исследована зависимость коэффициента фокусировки от рабочей частоты преобразователя f, радиуса прутка R и коэффициента затухания β, влияющего на добротность зондирующего импульса.

На рис. 2 представлено сравнение рассчитанной эпюры смещений в поперечной волне по диаметру прутка с полученными ранее результатами расчетов смещений в продольной волне [1].

С ростом частоты f наблюдается повышение коэффициента фокусировки, при этом для равных значений f коэффициент фокусировки поперечной волны $K_{\text{фТ}}$ в 2,3 раза больше, чем для продольной. Так, при f = 1 МГц коэффициент фокусировки продольной волны $K_{\text{фL}}$ = 3,5, в то время как $K_{\text{фТ}}$ = 8,3.

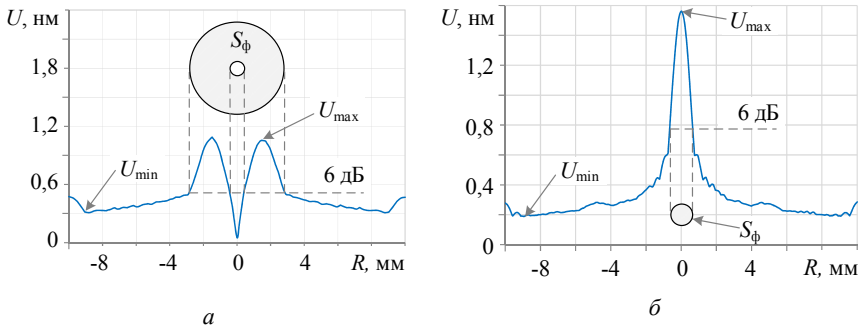


Рис. 2. Эпюры смещений продольной (*а*) и поперечной (*б*) акустических волн по диаметру прутка

При увеличении частоты f также наблюдается уменьшение площади фокусного пятна $S_{\text{ф}}$, при этом для равных значений f площадь фо-

кусного пятна продольной волны $S_{фL}$ в 20 раз больше, чем для поперечной. Границами фокусного пятна принято расстояние, на котором амплитуда смещений уменьшается на 6 дБ (в 2 раза), относительно амплитуды смещений в фокусе U_{max}. Полученная при моделировании площадь фокусного пятна продольной волны $S_{фL}$ = 26,8 мм^2, а площадь фокусного пятна поперечной волны $S_{фT}$ = 1,3 мм^2.

Рассчитанная зависимость коэффициента фокусировки от радиуса прутка R представлена на рис. 3. С ростом R наблюдается повышение коэффициента фокусировки, однако размер фокусного пятна при этом не изменяется.

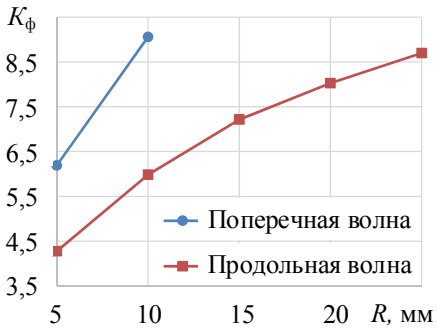


Рис. 3. Зависимость коэффициента фокусировки $K_ф$ от радиуса прутка R

Расчеты коэффициента фокусировки $K_{фT}$ при различных значениях β показывают, что с увеличением β (уменьшением добротности зондирующего импульса) наблюдается уменьшение коэффициента фокусировки. Так, при β = 1 1/с $K_{фT}$ = 10,8, при β = 1,7 1/с $K_{фT}$ = 8,3, а при β = 3,3 1/с $K_{фT}$ = 6,4.

Апробация полученных результатов

Для апробации результатов моделирования с помощью специальной установки [30] был проведен следующий эксперимент (рис. 4). Вблизи торца прутка радиусом R = 22 мм был установлен проходной ЭМА-преобразователь поперечных волн с рабочей частотой f = 2 МГц. Одновременно на торце прутка был установлен пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) продольных волн, с помощью которого регистрировались ультразвуковые импульсы, излучаемые проходным ЭМА-преобразователем. Вследствие ортогональности расположения преобразователей поляризация поперечной волны, излучаемой ЭМА-

преобразователем, совпадает с поляризацией продольной волны для ПЭП, что дает возможность регистрации сигналов.

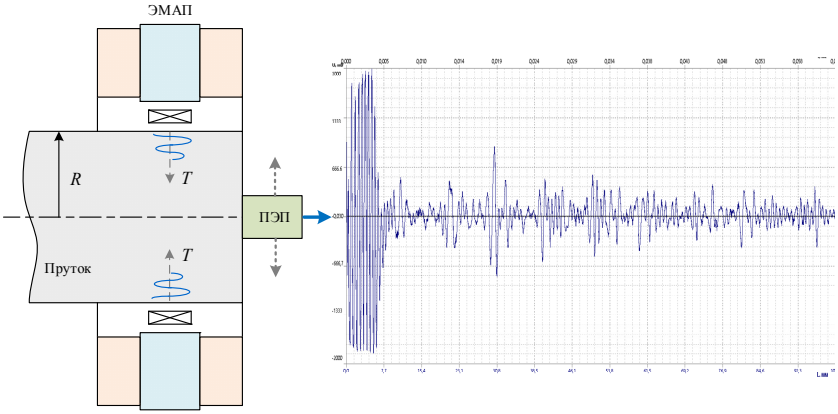


Рис. 4. Схема эксперимента

При размещении ПЭП строго по центру прутка наблюдается максимальная амплитуда регистрируемых импульсов. Перемещение ПЭП на 2 мм от центра прутка приводит к резкому уменьшению амплитуды импульсов в 2,5 раза, что свидетельствует о наличии локального увеличения амплитуды колебаний в центре прутка и подтверждает полученные результаты моделирования.

Выводы

В результате численного моделирования процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным ЭМА-преобразователем в прутках, можно сделать следующие выводы:

– увеличение рабочей частоты преобразователя приводит к увеличению коэффициента фокусировки и уменьшению площади фокусного пятна;

– с ростом диаметра прутка коэффициент фокусировки увеличивается, при этом площадь фокусного пятна остается неизменной;

– при повышении добротности зондирующего импульса коэффициент фокусировки увеличивается;

– коэффициент фокусировки поперечной волны больше, чем коэффициент фокусировки продольной волны при прочих равных услови-

ях, при этом площадь фокусного пятна для продольной волны больше, чем для поперечной;

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов и средств неразрушающего контроля пруткового проката зеркально-теневым ЭМА-методом. В частности, опираясь на результаты исследования, можно выбрать тип волны, рабочую частоту преобразователя и добротность зондирующего импульса для повышения чувствительности к поверхностным или внутренним дефектам, расположенным на различной глубине.

Список литературы

1. Моделирование формирования акустического поля проходного электромагнитно-акустического преобразователя в COMSOL Multiphysics / К. В. Петров, Г. Л. Пушина, А. Ф. Башарова, В. С. Стрелков // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск, 2017. – С. 292–298.

2. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – №. 8. – С. 20–28.

3. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

4. Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // Автометрия. 2016. – Т. 52, № 4. – С. 62–70.

5. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V.V. Muraviev, O.V. Muravieva, M.A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings, 2015. – Vol. 1683. – P. 020156.

6. *Муравьева, О. В.* Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократных отражений / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова // Дефектоскопия, 2015. – № 12. – С. 11–19.

7. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

8. Possibilities of the mirror through transmission electromagnetic-acoustic technique on multiple reflections / K. V. Petrov, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova,

V. A. Zorin // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 881, no. 1 – P. 012018

9. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнитно-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (71), – С. 46–50.

10. *Muraveva, O. V.* Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic-acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors / O. V. Muraveva, V. V. Muravev, Yu. V. Myshkin // NDT & E International. – January 2018. – Vol. 93. – Pp. 40–56

11. *Толипов, Х. Б.* Теоретическое и экспериментальное исследование волн, распространяющихся вдоль ребра клина // Прикладная механика и техническая физика. – 2012. – Т. 53, № 6. – С. 58–64.

12. Моделирование распространения акустических волн в цилиндрических объектах с дефектами в COMSOL Multiphysics / К. В. Петров, А. Ф. Башарова, Г. Л. Пушина, Е. В. Недзвецкая // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2017. – С. 284–291.

13. *Гусев, В. А.* Концентрация мощных акустических пучков в вязкоупругом материале с неоднородным распределением воздушных полостей // Computer. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 517–533.

14. *Муравьева, О. В.* Моделирование акустических полей синфазных электромагнитно-акустических преобразователей / О. В. Муравьева, А. В. Мышкин // Дефектоскопия. – 2013. – № 12. – С. 69–76.

15. *Григорьева, Н. С.* Рассеяние звука сферической упругой оболочкой, помещенной в волновод с жидким дном / Н. С. Григорьева, Г. М. Фридман // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, №. 4. – С. 424–424.

16. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 17–23.

17. *Petrov, K. V.* Mathematical modeling of the acoustic wave propagation generated by the through-type transducer in a cylindrical object / K. V. Petrov, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – P. 012114.

18. *Осетров, А. В.* Расчет параметров поверхностных акустических волн в пьезоэлектриках методом конечных элементов / А. В. Осетров В. Ш. Нгуен // Вычислительная механика сплошных сред. – 2011. – Т. 4, №. 4. – С. 71–80.

19. *Мышкин, Ю. В.* Влияние количества элементов в фазированной решетке на эффективность фокусировки в трубах большого диаметра / Ю. В. Мышкин, А. А. Фотина, Ю. О. Кощеева // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов

XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2017. – С. 276–283.

20. *Федотов, Е. С.* Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения / Е. С. Федотов, В. В. Пальчиковский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 3. – С. 107–126.

21. *Muravieva, O. V.* Modeling interactions between the magnetic and eddy current fields of the electromagnetic-acoustic transducer / O. V. Muravieva, K. V. Petrov, Yu.V. Myshkin // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – Pp. 1–4.

22. *Шабанов, А. С.* Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей / А. С. Шабанов, В. Ю. Нейман // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – № 5. – С. 96–100.

23. *Пахлов, Х. А.* Расчет магнитной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа поперечного намагничивания // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Двадцать третьей Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. (Москва, 2–3 марта 2017 г.). – М. : Изд. дом МЭИ, 2017. – С. 88.

24. *Белянков, В. Ю.* Анализ различных конструктивных вариантов накладного вихретокового преобразователя дефектоскопа // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 3. – С. 27–40.

25. *Будько, А. А.* Моделирование статических электромагнитных полей и расчет параметров в Comsol Multiphysics / А. А. Будько, Васильева О. В. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – С. 133.

26. *Костюкова, А. П.* Системы компьютерного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в COMSOL Multiphysics / А. П. Костюкова, А. Ф. Яхин // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support ITIDS'2015. Proceedings of the 3rd International Conference (18–21 мая 2015 г.). – Уфа : Изд-во ГОУ ВПО «УГАТУ», 2015. – С. 152–156.

27. *Казначеев, Д. С.* Моделирование электромагнитного расходомера // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Двадцать второй Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3 т. (Москва, 25–26 февраля 2016 г.). – М. : Изд. дом МЭИ, 2016. – С. 74.

28. Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объемных волн для неразрушающего контроля пруткового проката / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, Е. Н. Кокорина, В. Д. Стерхов, Д. В. Малютин // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 2–9.

29. *Мышкин, Ю. В.* Моделирование акустического поля проходных ультразвуковых преобразователей и фазированных решеток в трубах и прутках / Ю. В. Мышкин, К. В. Петров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-

техн. конф. (19–20 сент. 2017 г.). – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2017. – С. 519–529.

30. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.

K. V. Petrov, postgraduate student
G. L. Fedorova, A. F. Basharova, magister students
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Study of Focusing of Acoustic Waves Emitted by Through Type Electromagnetic-Acoustic Transducer

The paper presents the results of modeling the focusing of transverse acoustic waves, emitted by a through type electromagnetic-acoustic transducer. A comparison given with the results of the modeling longitudinal wave focusing, obtained earlier. The dependences of the focusing factor on operating frequency of transducer, diameter of the rod, and quality factor of probe pulse obtained. The correctness of the simulation results confirmed experimentally.

Keywords: simulation, simulation, electromagnetic-acoustic transducer, displacement diagram, focusing factor, focal spot.

УДК 615.04

В. А. Пономарев, д-р техн. наук, проф.
Н. В. Пономарева, аспирант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Цифровой спектрально-временной анализ музыкально-акустических сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье

Рассмотрены вопросы цифрового спектрального анализа музыкально-акустических сигналов на основе параметрического дискретного преобразования Фурье. Дан системный анализ методов и алгоритмов компьютерной (цифровой) обработки. Рассмотрена научная задача разработки новых методов, алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-

© В. А. Пономарев, Н. В. Пономарева, 2018

акустических сигналов. Предложена гипотеза эффективного (то есть с получением обладающих новизной результатов) ее решения. Приведены результаты эксперименотов.

Ключевые слова: цифровой анализ, музыкально-акустический сигнал, дискретное преобразование Фурье.

Введение

Методы и алгоритмы компьютерной (цифровой) обработки различного рода сигналов – (ЦОС) (*Digital Signal Processing – DSP*) играют важнейшую роль в информационных (компьютерных) технологиях (ИТ) (*Information Technology – IT*), в том числе и в компьютерных музыкальных технологиях.

Приоритетное место ЦОС при решении задач обработки информации об исследуемых объектах (системах) связано с тем, что именно методы и алгоритмы ЦОС позволяют получить информацию о свойствах и состояниях исследуемых объектов, о процессах и явлениях, происходящих в них. С помощью потоков информации (в том числе семантической (смысловой) и эстетической (эмоциональной)), переносимых сигналами, осуществляется восприятие музыкальной информации, управление сложными системами (естественного и искусственного происхождения), а также организуется их функционирование.

Системный анализ методов и алгоритмов ЦОС

Системный анализ методов и алгоритмов ЦОС, спектра их приложений в различных областях науки и техники выявил ведущую роль классических методов спектральной обработки сигналов [1]. Данный класс компьютерных методов основан на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) (*Discrete Fourier Transform – DFT*) и алгоритмах быстрого его вычисления – алгоритмах быстрого преобразования Фурье (БПФ) (*Fast Fourier Transform – FFT*).

Эффективность и результативность приложений этого класса методов объясняется целым рядом причин, главная из которых – адекватность математического аппарата ДПФ структуре различного вида сигналов – музыкально-акустических, виброакустических, речевых, биомедицинских, гидроакустических и многих других, что позволяет получить наглядную физическую интерпретацию и толкование полученных результатов.

Однако практика применения классических методов компьютерной обработки сигналов в частотной, временной и частотно-временной областях выявила кроме существенных достоинств данных методов и ряд их принципиальных недостатков, проявляющихся в виде нежелательных эффектов наложения, частокола, утечки, гребешкового эффекта как во временной, так и в частотной областях [1, 2].

Для решения задач проблематики классических методов спектральной ЦОС в работе [3] предложено множество полных, ортогональных, параметрических экспоненциальных базисных систем, на основе которых разработано обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П). Данное преобразование существенно расширило функциональные возможности классических методов ЦОС, пополнило их математический инструментарий, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкование получаемых результатов.

Алгебраическая форма ДПФ-П:

$$S_N(k,\theta)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}x(n)W_N^{(k+\theta)n},$$

$k=\overline{0,N-1}$; $0\le\theta<1$;

где $x(n)$ – дискретизированный во времени сигнал, $k=\overline{0,N-1}$;

θ – параметр ДПФ-П, $0\le\theta<1$;

$S_N(k,\theta)$ – коэффициенты ДПФ-П, совокупность которых определяет амплитудно-частотный и фазо-частотный спектры ДМАС (коэффициенты ДПФ-П, также как и коэффициенты ДПФ, часто называют бинами[1];

$W_N=\exp(-j\frac{2\pi}{N})$, $k=\overline{0,(N-1)}$.

Проведенный системный анализ методов и алгоритмов компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов[2]

[1] Отдельные коэффициенты (отсчеты) ДПФ-П называют также бинами (bin в переводе с английского – «хранилище», «ларь»), что подчеркивает тот факт, что энергия сигнала под кривой $\sin(N\cdot x/2)/[N\cdot\sin(x/2)]$ (передаточная характеристика фильтра ДПФ-П) попадает в «хранилище» данного коэффициента ДПФ-П.

[2] Музыкально-акустические сигналы (МАС) – звуковые сигналы, используемые в музыке.

(МАС) и вокально-инструментальных фраз[1] (ВИФ) показал, что, с одной стороны, МАС и ВИФ могут быть описаны математическими моделями в виде суммы ангармонических сигналов[2] (вокал, звуки музыкальных инструментов) и шумовых музыкальных сигналов (звуки маракасов, щеток и т. п.), с другой – выявил широкое применение классических методов спектральной обработки на основе ДПФ, которые, как указано выше, обладают не только существенными достоинствами, но и принципиальными недостатками.

Таким образом, налицо важная и актуальная научная задача разработки новых и совершенствования существующих методов, алгоритмов и средств компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических сигналов, а также разработки быстрых процедур их реализации.

Была предложена гипотеза эффективного (т. е. с получением обладающих новизной результатов) решения указанной важной и актуальной научной задачи путем разработки новых и совершенствования существующих методов, алгоритмов и средств компьютерной спектральной обработки музыкально-акустических, а также разработки быстрых процедур их реализации на основе параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П), которое является обобщением ДПФ.

Параметры компьютерной спектральной обработки МАС:

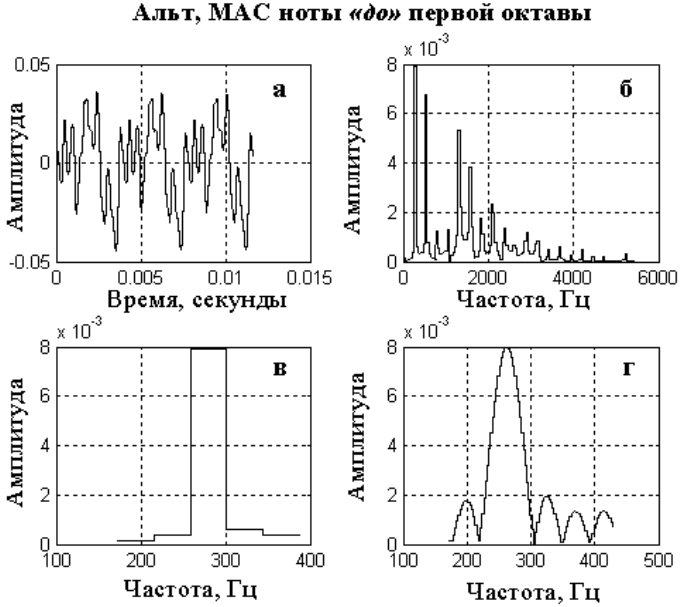
- частота дискретизации МАС – 44100 Гц;
- число разрядов АЦП – 16;
- длительность МАС – 1024 отсчета;
- значения параметра θ: – $\theta = k/16,\ k = \overline{0,15}$.

[1] Вокально-инструментальная фраза (ВИФ) (от греч. prasis – выражение, способ выражения) – обособленная единица музыкально-акустического сигнала (музыкальной речи), занимающая промежуточное положение между мотивом и предложением; ВИФ представляет собой средство вокально-инструментальной выразительности, обычно отделяется от соседних построений цезурой, выраженной средствами мелодики, гармонии, метроритма, фактуры, но отличается от предложений и периодов сравнительно меньшей завершенностью.

[2] Ангармонический сигнал – периодический сигнал, представляющий собой сумму основного гармонического сигнала (гармонического сигнала наинизшей частоты) и некоторых его гармоник (гармонических сигналов более высоких частот, частоты которых кратны частоте основного гармонического сигнала).

Для примера на рисунке приведен результат компьютерной спектральной обработки МАС ноты «до», сыгранной на музыкальном инструменте – альте.

Зона неопределенности МАС и его спектров обозначена ступенькой.



Компьютерная спектральная обработка МАС ноты «до» первой октавы (альт): *а* – МАС; *б* – энергетический спектр МАС, ДПФ; *в* – энергетический спектр МАС, ДПФ, увеличенный масштаб; *г* – энергетический спектр МАС, ДПФ-П, увеличенный масштаб

Заключение

Результаты экспериментальных исследований по выделению основного тона (ОТ) МАС различных музыкальных инструментов (пианино, флейта, кларнет, скрипка, альт, электрическая гитара, труба, тромбон, гобой) подтвердили правильность выбора ДПФ-П в качестве основы новых методов, алгоритмов и средств выделения ОТ.

Список литературы

1. *Трахтман, А. М.* Введение в обобщенную спектральную теорию. – М. : Сов. радио, 1972. – 352 с.

2. *Голд, Б.* Цифровая обработка сигналов / Б. Голд, Ч. Рэйдер ; пер. с англ. под ред. А. М. Трахтмана. – М. : Сов. радио, 1973. – 368 с.

3. *Пономарева, О. В.* Тенденции развития дискретных косвенных измерений параметров сигналов / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Метрология. – 2017. – Т. 1. – С. 20–32.

4. *Алдошина, И. А.* Музыкальная акустика : учебник / И. А. Алдошина, Р. Приттс. – СПб. : Композитор – Санкт-Петербург, 2006. – 720 с.

5. *Пономарева, Н. В.* Повышение точности и расширение функциональных возможностей цифровых фильтров на основе частотной выборки / О. В. Пономарева, Н. В. Пономарева // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2 (7). – С. 114–119.

6. *Пономарева, О. В.* Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31–38.

7. *Пономарева, Н. В.* Предобработка дискретных сигналов при спектральном анализе в системе компьютерной математики MATLAB / Н. В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4 (31). – С. 32–34.

V. A. Ponomarev, DSc in engineering, professor
N. U. Ponomareva, postgraduate
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Digital Spectral-Temporal Analysis of Musical-Acoustic Signals Based on the Parametric Discrete Fourier Transform

The problems of digital spectral analysis of musical-acoustic signals based on the parametric discrete Fourier transform are considered. The system analysis of methods and algorithms of computer (digital) processing is given. The scientific problem of development of new methods, algorithms of computer spectral processing of musical-acoustic signals is considered. A hypothesis is proposed of an effective (that is, obtaining novel results) solutions. The results of the experiments are presented.

Keywords: digital analysis, musical-acoustic signal, discrete Fourier transform.

УДК 621.01

О. В. Пономарева, д-р техн. наук, доц.
А. В. Пономарев, канд. экон. наук, преподаватель
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Виброакустическое функциональное диагностирование объектов. Взгляд на проблему

Рассмотрены проблемы виброакустического фукционального диагностирования. Разработана обобщенная частотная модель виброакустического сигнала. Дан системный анализ приложений методов цифровой обработки сигналов в предметных областях виброакустического фукционального диагностирования. Приведены перспективные научные направления развития методов виброакустического фукционального диагностирования.

Ключевые слова: виброакустический сигнал, функциональное диагностирование, объект, спектральный анализ, цифровая обработка сигналов.

Введение

Виброакустическое функциональное диагностирование (ВФД) основано на анализе порождаемых искусственными и естественными системами (объектами) виброакустических сигналов (ВАС). Данный вид неразрушающего (неинвазивного) метода диагностики широко применяется в различных предметных областях. Например, в медицине – для выявления патологии суставного хряща и нарушений в суставах пациента проводят анализ ВАС – виброартограмм [1]. В производстве и эксплуатации сложных машин и механизмов – для комплексной оценки их технического состояния на всех этапах жизненного цикла механических систем [2]. Методы и алгоритмы ВФД также широко используются при биомониторинге, мониторинге техногенной и природной среды [3].

Проблемы виброакустической функциональной диагностики объектов

В качестве примера рассмотрим такую предметную область, как *машиностроение*, в которой существует важная и актуальная пробле-

© Пономарева О. В., Пономарев А. В., 2018

ма, требующая своего решения – *проблема повышения технико-экономического уровня и качества машин и оборудования*.

Понятие ВАС (в широком смысле) связано с колебательными процессами (акустическими, вибрационными, магнитными, аэродинамическими, гидроакустическими, гидродинамическими колебаниями), возникающими в объекте диагностирования. ВАС является физическим носителем информации о техническом состоянии функционирующего объекта и характеризует ***динамические параметры*** последнего, в то время как другие виды технического диагностирования используют в качестве источника информации, как правило, статические параметры (температуру, состав масла, давление и т. п.).

В задачах ВФД объектов общепринято рассматривать функционирующий объект как некоторый преобразователь информации:

$$U = A \cdot Z \; ; \tag{1}$$

где $Z = [z_1, z_2, ...z_N]^T$ – вектор параметров объекта диагностирования; A – оператор преобразования; $U = [u_1, u_2, ..., u_N]^T$ – вектор диагностических признаков состояния объекта диагностирования. В этом случае задачей ВФД является решение обратной задачи:

$$Z = A^{-1} \cdot U \; . \tag{2}$$

Оператор A^{-1}, устанавливающий связь между пространством состояний объекта диагностирования и пространством диагностических признаков, определяет так называемую *диагностическую модель объекта*.

Как показал анализ, при построении диагностических моделей различного рода объектов для получения вектора диагностических признаков (1) широкое распространение получили частотные и частотно-временные представления либо непосредственно ВАС, либо некоторого его функционального преобразования (например**,** *огибающей* (мгновенной амплитуды) ВАС).

Поскольку при данном подходе поиск информативных диагностических признаков осуществляется в частотной области, данные диагностические модели получили название *частотных моделей*. Данные модели, отражая динамические характеристики диагностируемого объекта, позволяют связать проявление того или иного дефекта (включая этап его зарождения) с изменением частотного или частотно-временного спектра ВАС на определенной частоте или совокупно-

сти частот. Другими словами, тот или иной дефект находит свое отражение в появлении в энергетическом спектре (квадрате модуля частотного спектра) ВАС отдельных дискретных составляющих (ДС), гармонического ряда ДС или в аналогичной структуре энергетического спектра огибающей ВАС.

Системный анализ отечественных и зарубежных информационных источников показал, что к настоящему времени почти в каждой предметной области уже разработаны и разрабатываются вновь свои теоретические частотные диагностические модели объектов (естественных и искусственных), присущих данной конкретной предметной области.

Отсутствие обобщающей частотной модели ВАС – это *первая проблема ВФД* как научного направления, поскольку именно она во многом определяет подходы, методы и алгоритмы анализа и обработки информации.

Обобщенная частотная модель виброакустического сигнала

Обобщая на основе системного и информационного подходов частотные модели технического состояния объектов, предложенные в различных предметных областях, предлагается их представить в виде следующей *обобщенной частотной модели виброакустического сигнала:*

$$Y(t,r) = \{Y_1(t) + S(t)[1 + \gamma \cdot H(t)]\} \cdot R(r,t) \qquad (3)$$

где $S(t)$ – квазидетерминированная часть виброакустического сигнала:

$$S(t) = \sum_m \sum_k A_{m,k} \cos(2\pi k f_m t + \varphi_{m,k})$$

$Y_1(t)$ – шумовая часть виброакустического сигнала; γ – коэффициент модуляции; t – время; m, k – целые числа; f – частота; φ – фаза; $H(t)$ – квазидетерминированная модулирующая функция:

$$H(t) = \sum_n \sum_p A_{n,p} \cos(2\pi p f_n t + \varphi_{n,p})$$

$R(r,t)$ – коэффициент пространственно-временного затухания; r – пространственная координата; n, p – целые числа.

В настоящее время фундаментальная роль при решении задач, стоящих перед ВФД, отводится переходу на цифровые информационные технологии обработки ВАС [3–7], как основе современного *виброакустического функционального диагностирования* объектов различного назначения.

И, как это ни парадоксально, именно с существующей положительной устойчивой тенденцией перехода ВФД с аналоговой обработки ВАС на цифровую обработку ВАС (ЦО ВАС) связано *проявление второй проблемы ВФД.*

Действительно, ЦО ВАС обладает огромными преимуществами перед аналоговой обработкой ВАС (АО ВАС) (надежность, гарантированная точность, стабильность метрологических характеристик, высокая производительность и др.). Однако ЦО ВАС, во-первых, обладают не только существенными достоинствами, но и принципиальными *недостатками*, которые вытекают из природы и свойств преобразований, лежащих в основе цифровой обработки. Во-вторых, в течение многих десятилетий задачи ВФД решались специалистами по *ЦО ВАС* и, наконец, в третьих, *теория ЦО ВАС является точной наукой ,* а не основанной, как иногда полагают некоторые, на *аналогиях с теорией АО ВАС.* Именно непонимание принципиальных различий ЦО ВАС ЦО и ВАС при решении задач *проблематики ВФД* приводит зачастую не только к ошибочным выводам, но и принятию неверных решений с соответствующими последствиями [3–7].

Системный анализ приложений методов цифровой обработки в предметных областях виброакустической функциональной диагностики

В области компьютерных (цифровых) методов ВФД можно выделить следующие основные направления научных и прикладных исследований: *классические методы цифровой спектральной обработки ВАС* (спектральный[1] и векторный анализ[2], линейная и гомоморфная фильтрация, корреляционный анализ, скользящий Фурье-анализ, двойной по частоте спектр), *неклассические методы цифровой спек-*

[1] Дискретный спектральный анализ – группа методов дискретной фурье-обработки дискретных сигналов, которая не включает определение фаз синусоидальных составляющих информационных сигналов.

[2] Дискретный векторный анализ – группа методов дискретной фурье-обработки дискретных сигналов, при которой требуется получение полной информации о частотах, амплитудах и фазах синусоидальных составляющих исследуемых сложных информационных сигналов и/или их изменений во времени.

тральной обработки ВАС (методы, основанные на авторегрессионных моделях ВАС, методы Прони, минимальной дисперсии, собственных чисел), *дискретный вейвлетный анализ*[1].

Системный анализ приложений методов ЦОС в предметных областях ВФД позволил сделать следующие выводы:

- Классические методы цифровой спектральной обработки ВАС: сохраняют свою ведущую роль и эффективность своих приложений практически во всех предметных областях. Они применимы почти ко всем классам стационарных и смешанных ВАС.
- Спектральные оценки, полученные классическими методами, являются робастными (наиболее структурно устойчивыми) оценками спектров стационарных ВАС и наиболее эффективными за счет применения БПФ с вычислительной точки зрения.
- В то же время практика применения методов и алгоритмов цифровой обработки ВАС, основанных в той или иной мере на ДПФ, выявила и их недостатки, существенно снижающие результативность решения задач обработки ВАС классическими методами. Недостатки классических методов цифровой спектральной обработки ВАС вытекают непосредственно из свойств ДПФ и проявляются в виде известных эффектов (*эффектов наложения, частокола, утечки, гребешкового эффекта*).
- Наблюдается расширение спектра применения *неклассических методов цифровой спектральной обработки* стационарных случайных и смешанных ВАС, основанных на авторегрессионных и иных моделях ВАС. В этих методах обработки, в отличие от классических методов цифровой спектральной обработки, выбирается некоторая модель ВАС (модель авторегрессионного (АР) процесса, модель процесса скользящего среднего (СС) или модель авторегрессии – скользящего среднего (АРСС)) или иная модель, описываемая некоторым набором параметров, значения которых определяются в процессе обработки. Анализ этих методов и алгоритмов обработки показал, что их существенными недостатками являются *ограниченность области приложений* и *субъективность* [9].
- Теория вейвлетного анализа дает сложный, но достаточно эффективный инструмент для решения некоторых практических

[1] Дискретный вейвлетный анализ – группа дискретных вейвлет-преобразований (DWT), в рамках которых анализируемые сигналы рассматривают в терминах временных колебаний (вейвлетов), локализованных по времени и частоте.

задач, при этом *большую роль играет интуиция и опыт исследователя*. Вейвлетный анализ (мультиразрешающий анализ [10]), значительно расширивший аппарат *информационных технологий обработки нестационарных ВАС*, не является универсальным методом решения задач обработки и анализа ВАС. Тем более вейвлетный анализ не следует рассматривать как замену классическим методам спектральной обработки и анализа информации хотя бы в силу того, что полигармонические и стационарные дискретные ВАС широко распространены, как в природе, так и в технических системах, а результаты, полученные в рамках традиционных направлений обработки информации, *значительны и, главное, проверены временем*.

- Существующие попытки оценивания *абсолютного превосходства* тех или иных методов цифровой обработки ВАС над другими методами являются *изначально контрпродуктивными*, поскольку каждый метод, алгоритм цифровой обработки ИС имеет то или иное, но свое, наиболее эффективное приложение.

Заключение

Для решения задач проблематики классических методов спектральной ЦО ВАС в работах [6–8, 12] предложено множество полных, ортогональных, параметрических экспоненциальных базисных систем, на основе которых разработано обобщение ДПФ в виде параметрического ДПФ (ДПФ-П). Данное преобразование существенно расширило функциональные возможности классических методов ЦОС, пополнило их математический инструментарий, сохранив при этом возможность наглядной физической интерпретации и толкования получаемых результатов.

Однако следует подчеркнуть, что синтез (поиск) базисных систем, наиболее адекватных задачам ВФД, решаемых в той или иной предметной области (или группе областей) [7, 8, 12], является в настоящий момент актуальной научной проблемой, имеющей важное хозяйственное значение.

Эти слова в полной мере можно отнести к созданию обобщенной спектральной теории дискретных сигналов на конечных интервалах, на необходимость разработки которой указывалось в монографии [4].

Список литературы

1. *Рангайян, Р. М.* Анализ биомедицинских сигналов. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.

2. *Артоболевский, И. И.* Введение в акустическую динамику машин / И. И. Артоболевский, Ю. И. Бобровницкий, М. Д. Генкин. – М. : Наука, 1979. – 296 с.

3. *Оппенгейм, Э.* Применение цифровой обработки сигналов : пер. с англ. – М. : Мир,1980. – 552 с.

4. *Трахтман, А. М.* Введение в обобщенную спектральную теорию. – М. : Сов. радио, 1972. – 352 с.

5. *Голд, Б.* Цифровая обработка сигналов / Б. Голд, Ч. Рэйдер ; пер. с англ. под ред. А. М. Трахтмана. – М. : Сов. радио, 1973. – 368 с.

6. *Пономарева, О. В.* Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, – 2016. – 172 с.

7. *Ponomareva, O. V.* Metod for effective measurement of a sliding parametric Fourier spectrum / V. A. Ponomarev, O. V. Ponomareva, A.V. Ponomarev // Opto-electronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50, no. 2. – Pp. 132–138.

8. *Пономарева, О. В.* Развитие теории и разработка методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье : дис. … д-ра техн. наук: 05.13.01 / Пономарева Ольга Владимировна. – Ижевск, 2016. – 357 с.

9. *Яглом, А. М.* Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии. – Л. : Наука, 1981. – 281 с.

10. *Mallat, S. G.* Multiresoution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$ // Trans. Amer.Soc. – 1989. – Vol. 315. – Pp. 69–87.

11. *Муравьева, О. В.* Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В.Муравьев, М. А. Габбасова и др.// Автометрия. – 2016. – Т. 52, № 4. – С. 62–70.

12. *Пономарева, О. В.* Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О. В. Пономарева, А. В. Пономарев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2015. – № 3 (67). – С. 88–91.

O. V. Ponomareva, DSc in engineering, associate professor
A. V. Ponomarev, CSc in economics, teacher
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Vibroacoustic Functional Diagnosis of Objects. A Look at the Problem

The problems of vibroacoustic functional diagnosis are considered. A generalized frequency model of the vibroacoustic signal is developed. The system analysis of applications of methods of digital signal processing in subject domains of vibroacoustic functional diagnostics is given. Perspective scientific directions of development of methods of vibroacoustic functional diagnostics are presented.

Keywords: vibro-acoustic signal, functional diagnostics, object, spectral analysis, digital signal processing.

УДК 615.04

О. В. Пономарева, д-р техн. наук, доц.
В. Ю. Пономарева, аспирант
Д. Н. Марков, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Метод повышения функциональных возможностей визуализации объектов в медицинских ультразвуковых диагностических приборах

Рассмотрены методы получения 2D-изображений биологических тканей в медицинских ультразвуковых диагностических приборах при различных видах электронного сканирования. Предложен метод улучшения методов визуализации исследуемых объектов и структур, связанных с дискретностью визуализируемого УЗ-сигнала в плоскости сканирования.

Ключевые слова: эхо-сигнал, интерполяция, дискретное преобразование Фурье, ультразвуковой диагностический прибор, сканирование, акустическая строка.

© Пономарева О. В., Пономарева В. Ю., Марков Д. Н., 2018

Введение

Среди методов интроскопии, применяемых в медицине для визуализации внутренних объектов и структур, важную роль играют методы, основанные на свойствах ультразвуковых волн (УЗ-волн) (акустических волн с частотой выше 20 кГц) [1]. Это связано с рядом достоинств УЗ-методов [2], среди которых отметим их высокую информативность при оценке состояния биологических тканей, неинвазивность и относительную безвредность для участников медицинского обследования.

Постановка задачи

В медицинских ультразвуковых диагностических приборах (МУЗДП) выбор используемых длин УЗ-волн (частот импульсного УЗ-сигнала) и числа каналов проводят исходя из следующих физико-технических характеристик:

- средней скорости УЗ-волн в мягких биологических тканях;
- снижения энергии УЗ-волн (затухания УЗ-волн) как функции их частоты по мере их проникновения вглубь мягких биологической ткани за счет отражения, рассеяния, поглощения и расходимости УЗ-луча (затухания УЗ-волн);
- требуемой разрешающей способности (поперечной и продольной) МУЗДП (возможности УЗ-прибора визуализировать мелкие детали исследуемых объектов и структур в В-режиме).

Учитывая, что в результате многочисленных экспериментальных исследований скорости распространения УЗ-волн в различных биологических средах установлены [2] (табл. 1), а разрешающая способность диагностического УЗ-прибора соизмерима с длиной волны его импульного сигнала, в МУЗДП наиболее часто применяются следующие длины волн [2]:

$$\lambda = 0,44 \text{ мм} \Leftrightarrow f = 3,5 \text{ МГц}; \quad \lambda = 0,31 \text{ мм} \Leftrightarrow f = 5,0 \text{ МГц};$$
$$\lambda = 0,21 \text{ мм} \Leftrightarrow f = 7,5 \text{ МГц}; \quad \lambda = 0,15 \text{ мм} \Leftrightarrow f = 10 \text{ МГц}. \qquad (1)$$

МУЗДП по техническому уровню принято делить на 4 класса, характеристики которых приведены в табл. 2 [2].

Таблица 1. **Скорость УЗ-волн в различных средах**

Среда	Скорость звука м/с
Воздух (при нормальных условиях)	342
Дистиллированная вода(при +20 °С	1480
Легкие	400–1200
Жировая ткань	1350–1470
Мозг	1520–1580
Кровь	1540–1600
Печень	1550–1610
Мышечная ткань	1560–1620
Почка	1560
Мягкие ткани (среднее значение)	1540
Костная ткань	2500–4300
Камни печени	1400–2200

Таблица 2. **Разделение МУЗДП на классы по техническому уровню**

Класс прибора	Число каналов (лучей) приемопередатчика	Число элементов пьезо-преобразователя
Простые МУЗДП	16	80
МУЗДП среднего класса	32 или 48	96 или 112
МУЗДП повышенного класса	64	128
МУЗДП высокого класса	128–512 (1024)	128–512 (1024)

Постановка задачи

Общей проблемой визуализации в МУЗДП является проблема «*зернистости изображений»* исследуемых объектов и структур, вытекающая непосредственно из природы визуализации объектов в УЗ-диапазоне, или другими словами – из природы поперечной и продольной разрешающей способности МУЗДП.

Напомним, что под *продольной разрешающей способностью МУЗДП* понимается разрешение огибающих импульсных УЗ-эхосигналов от двух близко расположенных точечных отражателей вдоль оси УЗ-луча. Учитывая, что импульс УЗ-сигнала должен содержать не менее 1–2 периодов высокочастотного колебания, нетрудно понять, что продольная разрешающая способностью МУЗДП падает с уменьшением частоты УЗ-импульсного сигнала, а максимальная глубина проведения УЗ-исследования растет. Под *поперечной разрешающей способностью МУЗДП* понимается разрешение огибающих

импульсных УЗ-эхосигналов от двух близко расположенных точечных отражателей перпендикулярно оси УЗ-луча.

Подчеркнем, что в том и другом случае речь идет, по сути, *о потере информации об объекте исследования* из-за дискретности ее получения. В первом случае вдоль УЗ-луча в силу длительности имульса-УЗ-сигнала, а во втором случае поперек оси УЗ-луча в силу ограниченности числа используемых УЗ-каналов (УЗ-лучей).

В настоящее время для решения проблемы зернистости при всех видах электронного сканирования [2] (линейном, конвексном, микроконвексном, фазированном секторном и векторном) применяется линейная интерполяция [3]. Серьезным недостатком такого вида интерполяции является ее «*локальность*», поскольку при этом совершенно не учитывается поведение УЗ-эхосигнала за пределами одного отсчета.

Для устранения указанного недостатка визуализации объектов в МУЗДП, повышения их фукциональных возможностей предлагается выполнять соответствующую интерполяцию УЗ-эхосигнала рядом Котельникова, с помощью алгоритма быстрого параметрического дискретного преобразования Фурье (БПФ-П), что позволяет учитывать поведение всего УЗ-эхосигнала в полости сканирования.

Решение задачи

Если представить значения УЗ-эхосигналов в N УЗ-лучах в виде вектора N-мерного линейного пространства**:**

$$X_N = \left[x(0), x(1), ..., x(N-1)\right]^T \textbf{,}$$

где T – знак транспонирования, то прямое и обратное ДПФ в матричной форме задается следующими матричными соотношениями:

$$\text{прямое ДПФ: } S_N = \frac{1}{N} F_N X_N \,, \tag{2}$$

$$\text{обратное ДПФ (ОДПФ): } \quad X_N = F_N^* S_N \,, \tag{3}$$

где * – знак комплексного сопряжения,

$S_N = \left[s(0), s(1), ..., s(N-1)\right]^T$ – вектор коэфициентов разложения X_N по системе ДЭФ, задаваемой матрицей F_N:

$$F_N = \begin{array}{c} \\ 0 \\ 1 \\ . \\ . \\ (N-1) \\ k \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & . & . & (N-1) & n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & . & . & 1 \\ 1 & W_N^1 & . & . & W_N^{(N-1)} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 1 & W_N^{(N-1)} & . & . & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \end{array}, \quad (4)$$

$$W_N = \exp(-j\frac{2\pi}{N}).$$

Применение ДПФ к X_N, получение спектра $S_N = [s(0), s(1), ..., s(N-1)]^T$ в виде вектора N-мерного линейного пространства, помещение $(r-1)\cdot N$ нулевых отсчетов в средину вектора S_N и выполнение ОДПФ полученного вектора дает возможность найти значения вектора X_N в r раз большем числе отсчетов [4], причем методом интерполяции, а не аппроксимации (разница между этими методами приближения функций прекрасно пояснена в [3]). Отметим, что в данном методе при определении интерполированных отсчетов учитываются все значения вектора N-мерного линейного пространства X_N, а не только соседних отсчетов.

Недостатком данного подхода является существенное увеличение необходимой памяти процессорных измерительных средств (ПрИС), непризводительные вычислительные затраты с нулевыми отсчетами и ограничение на число r, поскольку для применения БПФ по основанию 2 число $r \cdot N$ должно быть степенью двух.

В работе [5] на основе анализа матрицы ОДПФ вектора X_N, дополненного нулевами отсчетами, предложено *модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье* (МДПФ-П),

$$X_{N,\xi} = \frac{1}{N} F_{N,\xi} S_N, \quad 0 \le \xi < 1; \quad (5)$$

где $\xi = 0,\ 1/r,\ ...,(r-1)/r$; $k, n = \overline{0,(N-1)}$,

$$F_{N,\xi} = \begin{array}{c} \\ 0 \\ 1 \\ . \\ . \\ N-1 \\ n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 0 & 1 & . & N/2-1 & . . & N-1 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & W_N^{-\xi} & . & W_N^{-\xi(N/2-1)} & . . & W_N^{-\xi(N-1)} \\ 1 & W_N^{-(1+\xi)} & . & W_N^{-(1+\xi)(N/2-1)} & . . & W_N^{-(1+\xi)(N-1)} \\ . & . & . & . & . . & . \\ . & . & . & . & . . & . \\ 1 & W_N^{-(N-1+\xi)} & . & W_N^{-(N-1+\xi)(N/2-1)} & . . & W_N^{-(N-1+\xi)(N-1)} \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ k \end{array}, \quad (6)$$

$$W_N^{-k(n+\xi)} = \exp\left[+ j\frac{2\pi}{N}k(n+\xi)\right],$$

применение которого позволяет получить искомый результат быстрыми алгоритмами для любого целого r, положив $\xi = 0,\ 1/r,\ ...,(r-1)/r$ [5].

Вывод

В настоящее время благодаря целому ряду примуществ цифровой обработки сигналов (ЦОС) перед аналоговой обработкой [3, 4] при реализации МУЗДП различного класса наблюдается интенсивный переход на цифровые технологии [5], что позволяет, опираясь на БПФ-П, эффективно (т. е. с получением новых результатов) реализовать предложенный метод.

Список литературы

1. Ультразвук в медицине. Физические основы применения : пер. с англ. / под ред. Хилла К. и др. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 544с.

2. *Осипов, Л. В.* Ультразвуковые диагностические приборы: практическое руководство для пользователей. – М. : Видар, 1999. – 256 с.

3. *Трахтман, А. М.* Введение в обобщенную спектральную теорию. – М. : Сов. радио, 1972. – 352 с.

4. *Голд, Б.* Цифровая обработка сигналов / Б. Голд, Ч. Рэйдер ; пер. с англ. под ред. А. М.Трахтмана. – М. : Сов. радио, 1973. – 368 с.

5. *Пономарева, О. В.* Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – 172 с.

6. *Ponomareva, O. V.* Metod for effective measurement of a sliding parametric Fourier spectrum / V. A. Ponomarev, O. V. Ponomareva, A. V. Ponomarev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50. – No. 2. – Pp. 132–138.

O. V. Ponomareva, DSc in engineering, associate professor
V. Yu. Ponomareva, postgraduate
D. N. Markov, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Method of Increasing the Functionality of Visualization of Objects in Medical Ultrasound Diagnostic Devices

Methods for obtaining 2D images of biological tissues in medical ultrasound diagnostic devices for various types of electronic scanning are considered. A method is proposed for improving the visualization methods of the objects under study and the structures associated with the discreteness of the ultrasound signal being visualized in the scanning plane.

Keywords: echo signal, interpolation, discrete Fourier transform, ultrasonic diagnostic device, scanning, acoustic line.

УДК 621.38

О. В. Пономарева, д-р техн. наук, доц.
В. Д. Ходырев, Т. К. Пушкарева, магистранты
А. В. Шагбедов, студент
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Цифровая обработка виброакустических сигналов в среде LabVIEW на персональном компьютере

Рассмотрены вопросы реализации систем цифровой обработки виброакустических сигналов в среде LabVIEW на персональном компьютере. Дан системный анализ современного состояния систем цифровой обработки виброакустических сигналов. Приведены результаты оценки качества изготовления коробок передач специальных токарных станков. Определены основные научные направления дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: цифровая обработка, виброакустический сигнал, персональный компьютер, системный анализ, спектрально-временной анализ.

© Пономарева О. В., Ходырев В. Д., Пушкарева Т. К., Шагбедов А. В., 2018

Введение

Системный анализ современного состояния систем цифровой обработки (ЦО) виброакустического сигналов (ВАС) (систем ЦО ВАС) [1] позволил сделать следующие выводы.

Проведение измерений всегда является частью систем ЦО ВАС, в связи с чем общепринято считать ВАС *носителями общей измерительной информации*.

В системах ЦО ВАС важное значение придается обеспечению выполнения современных требований к единству и точности измерений информационных параметров ВАС [1], поскольку необеспечение необходимых метрологических характеристик приводит к серьезным последствиям в приложениях.

Совокупность информационных параметров, характеризующих объект диагностирования, применяемые методы и средства их измерения и обработки, требования к функциональным возможностям и метрологическим характеристикам определяются, прежде всего, задачами, стоящими в целом перед суперсистемами, в состав которых входят системы ЦО ВАС, а также условиями решения этих задач.

В работе [1] на основе системного подхода и теории сложных систем предложена структурная обобщенная иерархическая функциональная морфологическо-информационная модель системы виброакустического функционального диагностирования объектов (СВФДО) (рис. 1).

Структура СВФДО иерархическая, детерминированная и адаптивная. Композиционные свойства определяются способом объединения элементов в подсистемы. Композиция СВФДО определяется в основном рецепторными подсистемами (способными преобразовывать внешнее воздействие в информационные сигналы, например, СПВиВЦ) и рефлексивными подсистемами (способными преобразовывать процессы на информационном уровне).

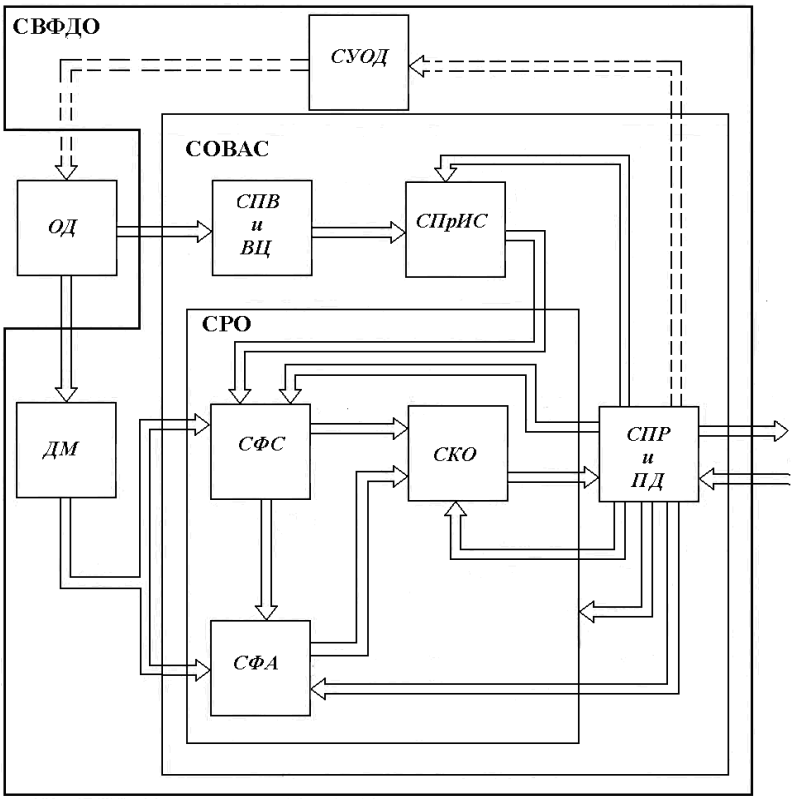


Рис. 1. Обобщенная функционально-структурная схема системы СВФДО: ОД – объект диагностирования; ДМ – диагностическая модель; СОВАС – система обработки виброакустических сигналов; СУОД – система управления объектом диагностирования (может отсутствовать, поэтому связи показаны пунктиром). Подсистемами СОВАС являются: СПВиВЦ – система первичных вибропреобразователей и входных цепей; СПрИС – система процессорных измерительных средств измерения параметров виброакустического сигнала; СПРиПД – система принятия решения и постановки диагноза; СРО – система распознавания образов, включающая в себя СФС (систему формирования словаря диагностических признаков), СФА (систему формирования алфавита классов (диагнозов)), СКО (систему классификации образов)

Роль и место информационной технологии виртуальных приборов в решении задач цифровой обработки виброакустических сигналов

Разработка и реализация методов, алгоритмов и средств ЦО ВАС в каждой предметной области в общем случае является повторяющимся процессом, в рамках которого находится решение проблемы H:

$$H = \{Q, F, V\};$$

где $Q = \{Q_i\}$ – *множество целей*, достижение которых разрешает проблему H. Определяется требованиями к средствам ЦО ВАС, которые, в свою очередь, определяются СВФДО исходя из повышения эффективности, надежности и качества диагностируемой исследуемой технической системы;

$F = \{F_j\}$ – *множество свойств проблемы* предполагает описание как свойств средств ЦО ВАС, так и описание их взаимодействия с суперсистемой и (или) средой, в состав которой оно входит;

$V = \{V_k\}$ – *множество гипотез (альтернатив)* разрешения проблемы H (множество операторов, с помощью которых достигается разрешение проблемы H).

При этом с одной стороны, время и выделяемые средства на разработку средств ЦО ВАС сокращаются, с другой стороны, постоянно растут требования к научно-техническим, технико-экономическим характеристикам разрабатываемых средств ЦО ВАС. И все это происходит на фоне постоянного усложнения методов и алгоритмов, которые должны реализовывать разрабатываемые средства ЦО ВАС.

В то же время инженеры-разработчики методов, алгоритмов и средств ЦО ВАС в своей практической деятельности широко используют персональные компьютеры (ПК) как *при определении структуры средств, методов и алгоритмов обработки* в проектируемом средстве ЦО ВАС, так и при его *моделировании, макетировании, настройке и регулировке.*

Отметим, что до недавнего времени при решении указанных задач инженер был вынужден прибегать к помощи профессиональных программистов, которые, как правило, не являлись специалистами в конкретной предметной области применения средств ЦО ВАС. В результате резко возрастало время разработок и, главное, снижалось их качество.

Положение изменилось с появлением *новой информационной технологии – технологии виртуальных приборов,* разрабатываемых в программно-инструментальной среде LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)[1].

Отметим, что термин «виртуальный прибор» (*ВП, англ. VI – Virtual Instruments*) не вполне удачен, т. к. может вводить в заблуждение. Средства обработки ВАС, разработанные по данной технологии, не являются виртуальными в исти

нном понимании этого слова и имеют дело с реальными ВАС. Появление термина «*виртуальный*» в названии средства ЦО ВАС объясняется технологией *виртуальной имитации функций ЦОИС математическими и программными методами* [2].

Программно-инструментальная среда LabVIEW позволяет создавать и отрабатывать и системы ЦО ВАС практически любой сложности, уменьшив затраты и время на их разработку, повысив их качество. Графический язык типа G и концепция потокового программирования LabVIEW) позволяет решать задачи более удобными и эффективными методами, чем традиционные текстовые языки. При этом, несмотря на высокий уровень абстракции кода, производительность программ, написанных в среде LabVIEW, остается сопоставимой с языками типа С, благодаря встроенному компилятору кода [3].

Таким образом, LabVIEW предоставляет возможность создания на базе ПК систем ЦО ВАС с заданными метрологическими характеристиками, реализующих функции множества средств цифровой обработки.

Разработка системы цифровой обработки виброакустического сигнала на базе ПК в среде LabVIEW

Разработка системы ЦО ВАС на базе ПК в среде LabVIEW предполагает решение следующих основных задач:

- выбор средств ввода ВАС в систему ВФДО исходя из числа небходимых аналоговых каналов, максимальной частоты выборки, требуемого частотно-временного разрешения, диапазонов изменения входных сигналов и размеров системы ЦО ВАС;
- выбор методов и алгоритмов необходимых для реализации задач, стоящих перед СВФДО;
- разработка структуры в системе ЦО ВАС.

[1] http://www.labview.ru

В качестве устройства сбора данных результатов измерений были выбраны два USB-устройства сбора данных *компании National Instruments*: NI USB – 6008 и NI USB – 6009. Была рассмотрена также задача использования в качестве устройства ввода/вывода звуковой карты персонального компьютера.

Выбор звуковых карт для ввода ВАС в ПК проводился на основе анализа следующих основных характеристик: частота дискретизации (оцифровки) аналогового сигнала, разрядность и динамический диапазон, отношение сигнал/шум (*SNR – Signal to Noise Ratio*), коэффициент нелинейных искажений.

Современные звуковые карты, как правило, позволяют реализовывать режим «*full duplex*», аппаратная и программная поддержка которого обеспечивается их производителем. Данный режим позволяет путем создания двух независимых виртуальных приборов в программно-инструментальной среде LabVIEW реализовать процессорные измерительные средства прямых и косвенных спектрально-временных измерений различного назначения на базе ПК. Современные звуковые карты могут поддерживать частоты дискретизации от 8 кГц до 192 кГц, что, *согласно теореме Котельникова*, соответствует частотному диапазону входных аналоговых сигналов от 4 кГц до 96 кГц (обычно нужно делать запас по частоте дискретизации в 4–8 раз). Разрядность АЦП и ЦАП современных звуковых карт также колеблется от 8 до 24 разрядов, что соответствует числу уровней оцифровки входного аналогового сигнала от 256 уровней до 167777216 уровней. Соответствующий динамический диапазон изменяется от 48 дБ до 144 дБ. Шум дискретизации есть всегда и составляет не менее половины младшего разряда. Например, для 16-разрядной звуковой платы отношение сигнал/шум (SNR) не может быть лучше, чем 93 дБ. И наконец, коэффициент нелинейных искажений (*Total Harmonic Distortion, THD*), измеряемый в процентах, характеризует нелинейные искажения восстанавливаемого цифрового сигнала через ЦАП. Если коэффициент нелинейных искажений (THD) равен 1 % – то это *«грязное звучание»*, 0,1 % – «*нормальное звучание*» , 0,01 % – «*чистое звучание класса Hi-Fi*», 0,002 % – «*звучание класса Hi-Fi End*».

СВФДО (рис. 1) была реализована на персональном компьютере в среде проектирования инженерных приложений MATLAB и в программно-инструментальной среде LabVIEW. В качестве устройства ввода/вывода была использована звуковая карта персонального компьютера как альтернатива USB-устройствам сбора данных компании

National Instruments: NI USB – 6008 и NI USB – 6009. В системе ЦО ВАС в СВФДО были реализованы методы и алгоритмы спектральной обработки, подробно рассмотренные в монографии [4].

Разработанная система СВФДО была применена для оценки качества изготовления специальных токарных станков моделей 250 ИТП, 250 ИТВ, 250 ИТВФ1. Повышенную вибрацию и шум в станках могут создавать различные узлы и механизмы, но основную долю вносят коробки передач. Их вибрации и шум связаны с погрешностями изготовления, сборки и монтажа, наличие которых приводит также к появлению вредных динамических нагрузок, снижающих долговечность и точность станка в целом. Дефекты изготовления, сборки и монтажа приводят к появлению в спектре ВАС отдельных дискретных составляющих (ДС) и рядов ДС, параметры которых (амплитуды частоты, фазы) использовались в СВФДО в качестве информативных признаков [5].

Например, погрешности профилей зубьев какого либо колеса приводят к появлению ДС на частотах $f_{П} = \gamma \cdot n \cdot z / 60$, где γ – коэффициент, учитывающий прерывность процесса образования зубьев (для фрезерованных колес $\gamma = 6 \div 12$, для шлифованных колес $\gamma = 10 \div 20$); n – частота вращения вала, об/мин; z – число зубьев колеса. При циклических погрешностях, связанных с биением сопряженных колес, в спектре виброакустического сигнала появляются ДС на частотах $f_{Б1} = (l_1 \cdot z_1 \pm l_2) \cdot n_1 / 60$ и $f_{Б2} = (l_1 \cdot z_2 \pm l_2) \cdot n_2 / 60$, где n_1, n_2 – частоты вращения сопряженных колес, об/мин; z_1, z_2 – числа их зубьев; l_1, l_2 – 1,2,3,… Дефекты сборки коробок передач проявляются при увеличении межосевого расстояния в росте интенсивности ДС на зубцовых частотах $f_z = n \cdot z / 60$, а при наличии эксцентриситета – в появлении ДС на частотах $f_{Э1} = (l_1 \cdot z_1 - l_2) \cdot n_1 / 60$ и $f_{Э1} = (l_1 \cdot z_2 - l_2) \cdot n_2 / 60$. Дефекты подшипников, применяемых в коробках передач, погрешности их монтажа также приводят к появлению ряда ДС на характерных частотах. На рис. 2 приведена упрощенная кинематическая схема коробки передач указанных моделей металлорежущих станков.

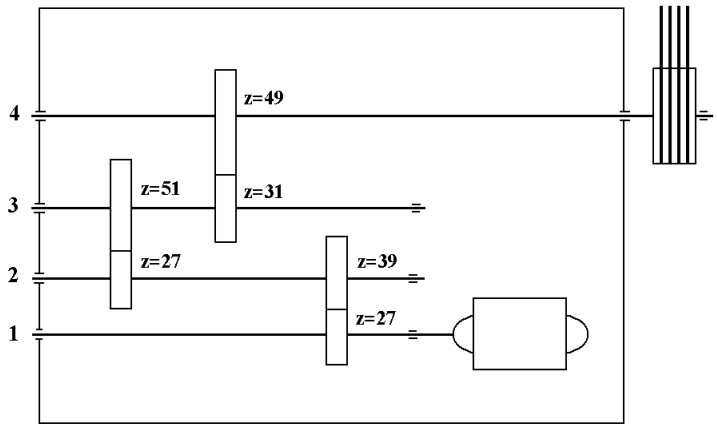


Рис. 2. Упрощенная кинематическая схема коробки передач металлорежущих станков специальных токарных станков моделей 250 ИТП, 250 ИТВ, 250ИТВФ1 при $n =$ 630 об/мин, $1 \div 4$ валы.

В таблице приведены расчетные частоты ДС при частоте вращения выходного шкива 630 об/мин, где $f_1 \div f_4$ – частоты вращения валов; $f_{z,12} \div f_{z,34}$ – зубцовые частоты сопряженных пар; $f_{П,1} \div f_{П,3}$ – частоты проявления погрешностей профилей зубьев ведущих колес соответственно с $z = 27, 27, 31$ (см. рис. 2).

Расчетные частоты ДС

Частота	f_1	f_2	f_3	f_4	$f_{z,12}$
Гц	21,43	14,83	7,55	4,78	578,7
Частота	$f_{z,23}$	$f_{z,34}$	$f_{П,1}$	$f_{П,2}$	$f_{П,3}$
Гц	400,5	234	6944	4806	2809

На рис. 3 приведен фрагмент энергетического спектра виброакустического сигнала, где четко виден ряд ДС около зубцовой частоты $f_{z,12}$. При этом наблюдается ряд ДС как на частотах $f_{z,12} + l_2 \cdot f_1$, так и на частотах $f_{z,12} - l_2 \cdot f_1$. Однако первый ряд менее выражен, что говорит об эксцентриситете ведущего колеса с $z = 27$ на валу 1.

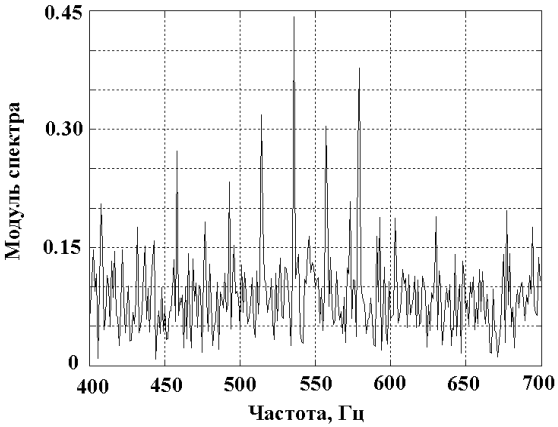


Рис. 3. Фрагмент энергетического спектра виброакустического сигнала.

Заключение

Системный анализ проблемы внедрения систем виброакустического функционального диагностирования объектов, ориентированных на применение в условиях производства диагностируемых объектов и обладающих широким спектром функциональных возможностей, показал, что для широкого внедрения СВФДО необходимы углубленные теоретические и экспериментальные исследования в следующих основных научных направлениях:

1. Разработка широкого спектра частотных и частотно-временных диагностических моделей, отражающих разнообразие и специфику диагностируемых объектов.

2. Повышение контролепригодности (контролеспособности) объектов диагностирования.

3. Создание цифровых методов и алгоритмов измерения, обработки и анализа виброакустических сигналов, которые учитывали бы специфику виброакустического функционального диагностирования объектов как предметной области.

4. Расширение функциональных возможностей средств виброакустического функционального диагностирования при повышении их надежности, снижении их стоимости и сложности.

Список литературы

1. *Пономарев, В. А.* Тенденции развития дискретных косвенных измерений параметров электрических сигналов / В. А. Пономарев, О. В. Пономарева // Метрология. – 2017. – Т. 1. – С. 20–32.

2. *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.

3. *Загидуллин, Р. Ш.* LabVIEW в исследованиях и разработках. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 352 с.

4. *Ponomarev, V. A.* Method for effective measurement of a sliding parametric Fourier spectrum / V. A. Ponomarev, O. V. Ponomareva, A. V. Ponomarev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2014. – Vol. 50, no. 2. – Pp. 132–138.

5. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., испр. – Т. 7 : в 2 кн. – М. : Машиностроение, 2006. – 829 с.

6. *Муравьева, О. В.* Анализ отраженных сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова и др. // Автометрия. – 2016. – Т. 52. – № 4. – С. 62–70.

O. V. Ponomareva, DSc in engineering, associate professor
V. D. Khodyrev, T. K. Pushkareva, magister students
A. V. Shagbedov, student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Digital Processing of Vibro-Acoustic Signals in the LabVIEW Environment on a Personal Computer

The issues of implementation of digital processing of vibroacoustic signals in the LabVIEW environment on a personal computer are considered. The system analysis of the current state of systems for digital processing of vibro-acoustic signals is given. The results of an assessment of the quality of the manufacture of gearboxes for special lathes are presented. The main scientific directions of further theoretical and experimental research.

Keywords: digital processing, vibro-acoustic signal, personal computer, system analysis, spectral-temporal analysis.

УДК 532.61.08:532.137

А. П. Савенков, канд. техн. наук, доц.
М. Э. Сафонова, В. А. Сычев, К. Е. Чечетов, аспиранты
E-mail: savencow@yandex.ru
Тамбовский государственный технический университет

Бесконтактные аэродинамические измерения поверхностного натяжения и вязкости жидкостей*

Представлено описание конструкций и принципов работы бесконтактных устройств для измерения поверхностного натяжения и вязкости, основанных на деформации поверхности контролируемой жидкости газовой струей.

Ключевые слова: бесконтактный, вязкость, газ, жидкость, измерение, поверхностное натяжение, струя.

Введение

Измерение вязкости и поверхностного натяжения жидкостей необходимо в различных отраслях промышленности, медицине и лабораторной практике. Вязкость и поверхностное натяжение, с одной стороны, сравнительно сильно реагируют на наличие примесей, изменение температуры и других факторов, что требует контроля их значений в технологических процессах и природной среде, с другой, их заметные изменения позволяют эффективно диагностировать состояние жидких веществ в промышленности и природе, а с третьей – высокая чувствительность этих величин к внесению добавок дает возможность влиять на ход технологического процесса [1–3].

До настоящего времени разрабатываются бесконтактные методы измерения поверхностного натяжения и вязкости, основанные на физических эффектах разной природы [4–9]. Такие методы позволяют предотвратить взаимное разрушающее воздействие средства и объекта измерения, уменьшить влияние средства измерения на его результат и снизить затраты времени и реактивов на очистку измерительных емкостей и чувствительных элементов.

© Савенков А. П., Сафонова М. Э., Сычев В. А., Чечетов К. Е., 2018

*Прикладные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0214 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0214).

Анализ различных бесконтактных методов измерения вязкости позволил выявить наиболее перспективные из них, а именно пневматические струйные [8, 9]. Методы левитирующей капли имеют специфическую область применения – измерение свойств расплавов [5, 6]. Для этих методов, как и для методов на основе рассеяния света на капиллярных тепловых волнах [4], а также методов на основе капиллярных волн, возбуждаемых электрическим полем [7], характерны следующие общие недостатки: необходимость применения технически сложных установок, влияние плотности жидкости на результат измерения поверхностного натяжения, невозможность применения для измерения свойств вязких жидкостей. Аэродинамические методы лишены подобных недостатков [8, 9].

В настоящей работе представлены устройства для бесконтактного измерения поверхностного натяжения и вязкости, основанные на деформации поверхности контролируемой жидкости струей газа.

Бесконтактное аэродинамическое измерение вязкости жидкости

Для измерения вязкости жидкости необходимо создание сдвигового течения. С этой целью в аэрогидродинамических методах применяют колебательный режим взаимодействия газа и жидкости, импульсное или гармоническое воздействие газовой струи [9]. Наилучшими метрологическими характеристиками и простотой в технической реализации отличается импульсный аэрогидродинамический метод с наклонным действием газовой струи, схема устройства для реализации которого представлена на рис. 1.

Суть импульсного метода заключается в следующем. В исходном состоянии лазерный луч триангуляционного детектора *2* [10] отражается от недеформированной поверхности жидкости *1* и воспринимается его фотоприемником. В момент времени t_0 на поверхность жидкости *1* под углом α из сопла *5* направляют струю газа с постоянной скоростью. Под действием струи поверхности жидкости деформируется и формируется волна, которая перемещается в направлении газового потока. В момент времени t_1 волна отклоняет отраженный луч, и на выходе детектора *2* формируется соответствующий сигнал. Под действием этого сигнала подача газа в сопло прекращается. О вязкости жидкости судят по времени $t = t_1 - t_0$ деформирующего действия струи.

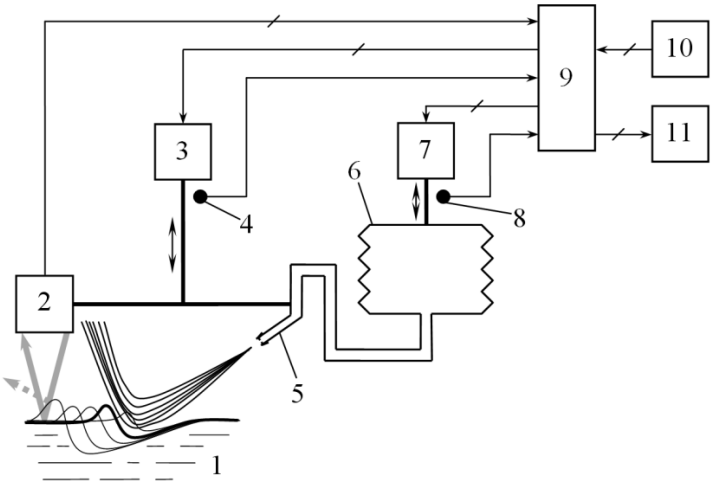


Рис. 1. Схема устройства для бесконтактного измерения вязкости жидкостей: *1* – жидкость; *2* – триангуляционный детектор расстояния; *3*, *7* – исполнительные механизмы; *4*, *8* – концевые выключатели; *5* – сопло; *6* – сильфон; *9* – блок управления; *10* – клавиатура; *11* – дисплей

При включении устройства, управляющий микропроцессорный блок *9* формирует сигналы, под действием которых исполнительный механизм *3* возвращает в исходное верхнее положение детектор *2* и сопло *5*, а исполнительный механизм *7* растягивает сильфон *6* до максимального объема. При достижении указанных положений замыкаются контакты соответствующих концевых выключателей *4* и *8*, и блок *9* прекращает подачу импульсов на электродвигатели исполнительных механизмов *3* и *7*.

Управление устройством осуществляется при помощи трехкнопочной клавиатуры *10* и дисплея *11*. По нажатию на соответствующую кнопку клавиатуры *10* производится установка измерительного преобразователя на заданное расстояние относительно поверхности контролируемой жидкости *1*. Блок управления *9* формирует последовательность импульсов, под действием которой кронштейн с закрепленными на нем элементами *2* и *5* опускается посредством механизма *3*. При достижении заданного расстояния до поверхности жидкости на выходе детектора *2* формируется соответствующий сигнал, под действием которого блок *9* прекращает подачу импульсов на входы испол-

нительного механизма *3*, и кронштейн с элементами *2* и *5* останавливается.

После нажатия на кнопку пуска измерительного процесса блок *9* формирует импульсы, заставляющие исполнительный механизм *7* сжимать сильфон *6* с постоянной скоростью. На выходе сопла *5*, расположенного над поверхностью жидкости *1* под углом α к ней, образуется струя воздуха, деформирующая поверхность жидкости. После отклонения луча детектора *2* волной, перемещающейся по поверхности жидкости в направлении действия струи, на вход блока *9* поступает соответствующий сигнал. Блок *9* фиксирует время деформирующего действия струи и переводит исполнительный механизм *7* в режим растяжения сильфона *6*. Степень сжатия сильфона зависит от вязкости жидкости *1*, поэтому его размеры определяют верхний предел измерения.

Растяжение сильфона *6* продолжается до достижения максимального объема, после чего вновь начинается его сжатие. Во время растяжения сильфона *6* струя воздуха на выходе сопла *5* отсутствует, вследствие чего происходит восстановление поверхности жидкости в месте контакта со струей газа. Процессы сжатия и растяжения сильфона *6* повторяются заданное число раз, необходимое для проведения многократных измерений с целью исключения случайной составляющей погрешности. Результаты многократных измерений интервалов времени деформирующего действия газовой струи усредняются, и по полученному значению блоком *9* определяется вязкость контролируемой жидкости *1*. Вычисленное значение вязкости выводится на дисплей *11*.

Бесконтактные аэродинамические измерения поверхностного натяжения

Методы измерения поверхностного натяжения, основанные на определении степени деформации поверхности жидкости под действием газовой струи, с момента создания предназначались для жидкостей с высокой вязкостью [8]. Несмотря на перспективность аэродинамических методов, на сегодняшний день не разработано измерительных устройств, позволяющих без сомнения назвать их бесконтактными. Во многих конструкциях определение степени деформации поверхности жидкости осуществляется через стенки или дно сосуда, что предъявляет к нему жесткие требования и, по сути, делает частью средства измерения [8, 11–13].

На рис. 2 представлена схема устройства для бесконтактного измерения поверхностного натяжения жидкостей.

На основании *15* жестко закреплены: струйная трубка *8*, полупрозрачный экран *10*, лазерный диод *14* и гидростатический указатель уровня *17*. В торце трубки *8* установлена диафрагма *9* с отверстием истечения струи диаметром *d*. Экран *10* расположен параллельно поверхности контролируемой жидкости *12*. Питание лазерного диода *14* осуществляется от генератора тока *16*. Плоскость поляризации излучения лазерного диода располагается перпендикулярно плоскости основания *15*. Угол φ между лазерным лучом и поверхностью жидкости выбран сравнительно малым (~20º) для получения полоски излучения на экране *10* с длиной, превышающей размеры углубления *13*, формируемого газовой струей на поверхности жидкости *12*.

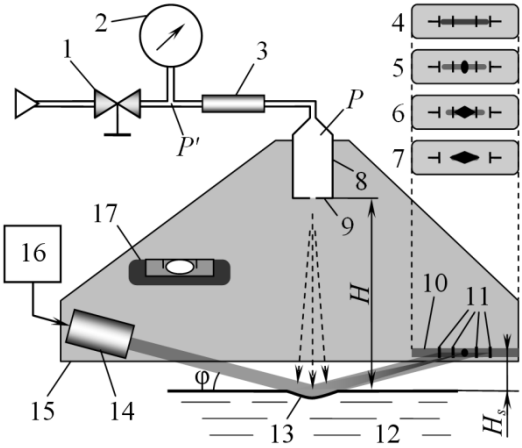


Рис. 2. Схема устройства для бесконтактного измерения поверхностного натяжения жидкостей: *1*, *3* – переменное и постоянное пневматические сопротивления; *2* – жидкостный микроманометр; *4–7* – изображения на экране *10*; *8* – струйная трубка; *9* – диафрагма; *10* – полупрозрачный экран; *11* – метки; *12* – жидкость; *13* – углубление; *14* – лазерный диод; *15* – основание; *16* – генератор тока

До проведения измерений ось струйной трубки *8* выравнивается по вертикали, диафрагма *9* размещается на заданном расстоянии *H* от недеформированной поверхности жидкости *12*. Выравнивание в плоскости схемы осуществляется с использованием указателя уровня *17*. Установка на заданное расстояние *H* и выравнивание по вертикали в плоскости перпендикулярной плоскости чертежа производится по

меткам *11*, нанесенным на экране *10*. При правильной установке устройства на экране *10* формируется изображение *4*, при котором полоска лазерного излучения находится по центру между крайними метками. После установки устройства в заданное положение расстояние от поверхности жидкости *12* до экрана *10* составляет H_s.

Подача воздуха от источника питания в трубку *8* осуществляется через ламинарные пневматическое сопротивления: переменное *1* и постоянное *3*. Интенсивность действия газовой струи на поверхность жидкости *12* регулируется при помощи переменного сопротивления *1* и контролируется по жидкостному микроманометру *2*.

Струя газа, вытекающая из отверстия в диафрагме *9*, формирует на поверхности жидкости *12* углубление *13* с осевой симметрией. Вогнутая поверхность углубления *13* фокусирует отраженное от него лазерное излучение на экране *10* с формированием изображения *5*. Конструкция устройства предусматривает прохождение лазерного луча строго по оси углубления. Контроль выполнения этого условия с высокой точностью осуществляется по пятну излучения на экране *10*. При малейших отклонениях лазерного луча от оси углубления пятно теряет симметрию.

О поверхностном натяжении σ судят по давлению P перед диафрагмой *9*, соответствующему заданной степени деформации поверхности контролируемой жидкости. Большему поверхностному натяжению соответствует большее давление. В связи с тем, что истечение газа из отверстия диафрагмы *9* происходит при малых перепадах давления, контроль интенсивности газовой струи осуществляется по избыточному давлению P' перед сопротивлением *3*.

Проведены исследования для трех критериев определения заданной степени деформации поверхности жидкости, соответствующих поз. *5*, *6*, *7* на рис. 2. Первый соответствует минимальной площади пятна излучения на экране *10* (поз. *5*). Второй определяется равенством размеров пятна сфокусированного излучения расстоянию между внутренними метками *11* экрана *10* (поз. *6*). Третий соответствует равенству размеров пятна сфокусированного излучения и полоски излучения, рассеянного краями углубления (поз. *7*). Наивысшая точность измерения поверхностного натяжения достигается при задании степени деформации по второму критерию.

Заключение

Макеты устройств для бесконтактного измерения вязкости и поверхностного натяжения жидкостей прошли экспериментальную проверку. Измерительные преобразователи отличаются пропорциональной зависимостью выходных сигналов от измеряемых величин. Диапазоны измерений для вязкости и поверхностного натяжения составляют 0,1–50 Па·с и 20–80 Н/м, соответственно, и не имеют теоретических ограничений по верхнему пределу. Относительная погрешность измерения вязкости не превышает 3 %, приведенная погрешность измерения поверхностного натяжения – 2 %. Представленные устройства позволяют производить измерения свойств прозрачных и непрозрачных жидкостей в любых сосудах с открытым верхом.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Михаилу Михайловичу Мордасову за создание научного направления, представленного в настоящей работе, всестороннюю поддержку и консультации.

Список литературы

1. *Муратова, Е. И.* Реология кондитерских масс : монография / Е. И. Муратова, П. М. Смолихина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 188 с.

2. Surface tension properties of human urine: relationship with bile salt concentration / C. O. Mills, E. Ellas, G. H. B. Martin, M. T. C. Woo, A. F. Winder // Clinical Chemistry and Laboratory Medicine. – 2009. – Vol. 26, no. 4. – Pp. 187–194. – DOI: 10.1515/cclm.1988.26.4.187.

3. *Хуторянский. Ф. М.* Исследование влияния динамического поверхностного натяжения на интенсивность поверхностной конвекции в процессе хемосорбции / Ф. М. Хуторянский, Ю. В. Аксельрод // Журнал прикладной химии. – 1975. – Т. 48, вып. 1. – С. 72–77.

4. *Nishimura, Y.* High-precision instrument for measuring the surface tension, viscosity and surface viscoelasticity of liquids using ripplon surface laser-light scattering with tunable wavelength selection / Y. Nishimura, A. Hasegawa, Y. Nagasaka // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85, no. 044904. – 11 p. – DOI: 10.1063/1.4871992.

5. *Zhou, K.* Determining thermophysical properties of undercooled liquid Ti–Al alloy by electromagnetic levitation / K. Zhou, H. P. Wang, B. Wei // Chemical Physics Letters. – 2012. – Vol. 521. – Pp. 52–54. – DOI: 10.1016/j.cplett.2011.09.061.

6. Surface tension and viscosity of molten vanadium measured with an electrostatic levitation furnace / J. T. Okada, T. Ishikawa, Y. Watanabe, P.-F. Paradis // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2010. – Vol. 42, no. 7. – Pp. 856–859. – DOI: 10.1016/j.jct.2010.02.008.

7. *Behroozi, F.* Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry / F. Behroozi, A. Perkins // American Journal of Physics. – 2006. – Vol. 74, no. 11. – Pp. 957–961. – DOI: 10.1119/1.2215617.

8. *Pfund, A.H.* Surface-tension measurements of viscous liquids / A. H. Pfund, E. W. Greenfield // Industrial and Engineering Chemistry. – 1936. – Vol. 8, no. 2. – Pp. 81–82. – DOI: 10.1021/ac50100a001.

9. *Мордасов, Д. М.* Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ / Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов, А. П. Савенков. – М. : Физматлит, 2012. – 352 с.

10. *Савенков, А. П.* Метрологический анализ бесконтактного лазерного триангуляционного детектора расстояния до зеркальной поверхности / А. П. Савенков, М. Э. Сафонова, В. А.Сычёв // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. междунар. науч. конф. : в 12 т. Т. 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – С. 93–96.

11. Пат. 71576 UA, G01N 13/02. Оптико-електронний вимірювач поверхневого натягу рідин / Й. Й. Білинський, О. С. Білошкурська, С. О. Сіренко. – № 2001042381 ; заявл. 10.04.2001 ; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12. – 2 с.

12. А. с. 1753369 СССР, G01N 13/02. Способ определения поверхностного натяжения жидкостей / В. П. Астахов, М. М. Мордасов, В. П. Журавлев. – № 4864578/25 ; заявл. 10.09.1990 ; опубл. 07.08.1992, Бюл. № 29. – 3 с.

13. *Мордасов, М. М.* Особенности применения термина «бесконтактный метод измерения» / М. М. Мордасов, А. П. Савенков, К. Е. Чечетов // Датчики и системы. – 2017. – № 4. – С. 47–52.

A. P. Savenkov, CSc in engineering, associate professor
M. E. Safonova, V. A. Sychev, K. E. Chechetov, postgraduate students
E-mail: savencow@yandex.ru
Tambov State Technical University, Russia

Non-contact Aerohydrodynamic Measurements of Surface Tension and Viscosity of Liquids

The descriptions of design and principal of operation for non-contact devices to measure the surface tension and viscosity based on the deformation of the tested liquid surface by gas jets are presented.

Keywords: contactless, gas, jet, liquid, measurement, surface tension, viscosity.

УДК 620.179.16

М. Ю. Соков, аспирант
О. В. Муравьева, д-р техн. наук, проф.
А. С. Захаров, магистрант
E-mail: pmkk@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Моделирование физических полей проходного электромагнитно-акустического преобразователя в деталях с резьбой*

В статье предложена модель механизма возбуждения акустических волн в изделиях с резьбой и исследованы два варианта расположения витков индуктора относительно витков резьбы.

Ключевые слова: моделирование, сила Ампера, ультразвуковой контроль, ЭМА, контроль резьбы.

Введение

Резьбовые соединения являются самым распространенным видом соединений деталей машин. Детали с резьбой составляют свыше 60 % от общего количества деталей современных машин. Широкое применение резьбовых соединений в машиностроении объясняется их достоинствами: универсальностью, высокой надежностью, малыми габаритами и весом крепежных резьбовых деталей, способностью создавать и воспринимать большие осевые усилия, технологичностью и возможностью точного изготовления. Надежность и долговечность резьбовых соединений обеспечиваются в том числе применением средств неразрушающего контроля (НК) как в процессе ее изготовления, так и при эксплуатации. Трудность обнаружения дефектов в сложном профиле резьбы, разнообразие материалов и типоразмеров деталей существенно затрудняют универсализацию методов НК. Среди известных методов НК следует отметить вихретоковый и магнитопорошковый, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность

© М. Ю. Соков, О. В. Муравьева, А. С. Захаров

*Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова» на 2014–2016 гг. по разделу «Организация проведения научных исследований».

[1–9]. Ультразвуковой контроль, обеспечивающий контроль резьбового соединения без разборки, не обеспечивает достаточную достоверность контроля вследствие возникновения многократных ложных сигналов, вызываемых отражением от резьбы.

Разрабатываемый авторами бесконтактный электромагнитно-акустический (ЭМА) метод контроля цилиндрических объектов показал свою перспективность при контроле цилиндрических объектов на наличие дефектов типа нарушения сплошности, при структуроскопии, оценке напряженно-деформированного состояния и оценке геометрии сечения [10–15].

При разработке ЭМА-преобразователей для деталей с резьбой требуется предварительный анализ создаваемых ими магнитных полей и полей вихревых токов с целью предварительной оценки их эффективности, оптимизации массогабаритных размеров, технологических зазоров, требований по шероховатости поверхностей элементов конструкции преобразователя. В работе проведено моделирование и исследование электродинамического (Лоренцева) механизма возбуждения акустических волн в детали с резьбой за счет взаимодействия магнитного поля и поля вихревых токов.

Сведения из теории

Электромагнитно-акустический преобразователь состоит из специальной системы подмагничивания и высокочастотного индуктора. Излучение акустической волны происходит благодаря электродинамическому механизму взаимодействия вихревых токов i_e, порождаемых переменным током высокочастотного индуктора длиной dl с постоянным магнитным полем B_0, и появлению сил Ампера:

$$F_A = i_в \left[dl \cdot B_0 \right]. \quad (1)$$

Силы Ампера F_A формируются в приповерхностном слое объекта контроля:

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\mu\sigma}\ , \quad (2)$$

где $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; σ – электропроводность; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота колебаний.

Импульсы акустической волны принимаются тем же преобразователем за счет обратного механизма, при котором высокочастотным индуктором регистрируются электромагнитные поля, порождаемые

вихревыми токами j в приповерхностном слое объекта, колеблющемся со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_0:

$$j = \sigma\left[V \cdot B_0\right]. \quad (3)$$

Решение задачи

Одним из наиболее эффективных и оперативных подходов является численное компьютерное моделирование методом конечных элементов в программной платформе COMSOL Multiphysics.

Моделирование магнитного поля и поля вихревых токов проведено с использованием модуля AC/DC программной среды COMSOL Multiphysics, используемой для моделирования электрических, магнитных и электромагнитных полей в статических и высокочастотных системах, в том числе с нелинейными эффектами намагничивания. Основные магнитные характеристики системы подмагничивания, используемые при моделировании, приведены в таблице. При моделировании использованы также справочные кривые намагничивания соответствующих материалов.

Основные параметры модели

Параметр	Значение
Материал постоянных магнитов	NdFeB
Внешний, внутренний диаметр магнитов, мм	70, 23
Остаточная индукция постоянных магнитов, Тл	1,38
Материал магнитопровода	Ст.20
Количество витков катушки	7
Ток индуктора, А	10
Радиус объекта контроля R, мм	16
Неферромагнитный зазор h, мм	1

Моделируемая система подмагничивания ЭМА-преобразователя (рис. 1) состоит из источников магнитного поля *2*, в качестве которого выступают постоянные магниты в форме шайбы, и магнитопровода *3* в виде кольца прямоугольного сечения. Такая конфигурация системы подмагничивания обеспечивает формирование магнитного поля вблизи поверхности объекта контроля с преимущественным направлением перпендикулярно продольной оси объекта контроля *1*. Катушка *4* с током формирует в ферромагнитном объекте контроля *1* вихревые токи, которые взаимодействуют с полем системы подмагничивания,

формируя в тонком приповерхностном слое силы Ампера, направленные перпендикулярно радиусам сечения объекта и обеспечивающие распространение поперечных волн.

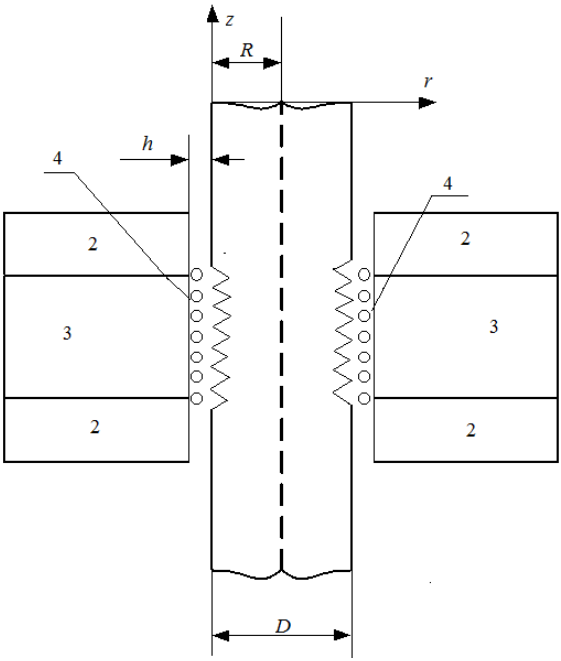


Рис. 1. Модель проходного ЭМА-преобразователя: *1* – объект контроля, *2* – постоянные магниты, *3* – магнитопровод, *4* – индуктор (катушка), *5* – объект контроля

Результаты и обсуждение

Поскольку исследуемый проходной ЭМА-преобразователь имеет осесимметричную конструкцию, для сокращения времени вычисления и получения более точных результатов вычислений была построена осесимметричная двумерная модель преобразователя. В результате моделирования магнитного поля системы подмагничивания были получены его распределение и топология (рис. 2), а также график осевой составляющей вектора поля подмагничивания по огибающей резьбы под поверхностью объекта контроля (рис. 3).

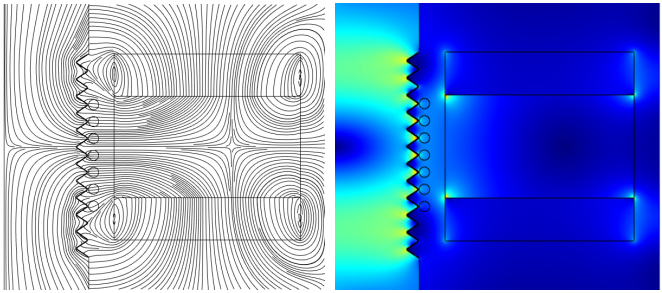


Рис. 2. Топология магнитного поля (*слева*),
распределение магнитного поля (*справа*)

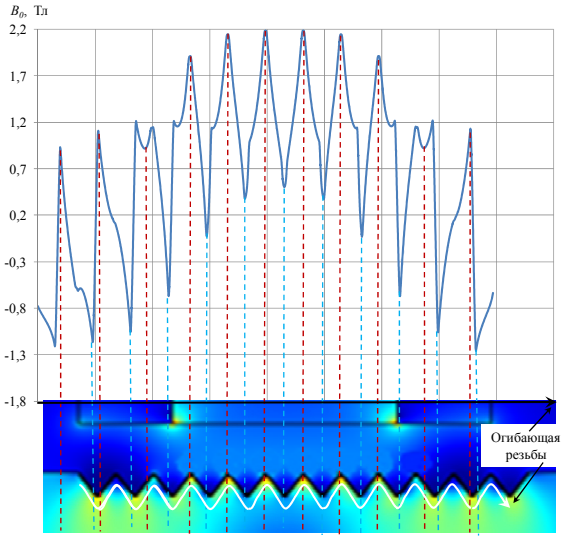


Рис. 3. График осевой составляющей вектора поля подмагничивания

Моделирование взаимодействия поля вихревых токов с резьбой выполнено для двух вариантов расположения катушки. В первом случае расчет выполнялся при вложении катушки в резьбу, во втором случае – катушка расположена над гребнями резьбы. График распределения поля вихревых токов по огибающей резьбы под поверхностью объекта контроля, полученный в первом случае, представлен на рис. 4, во втором – на рис. 5.

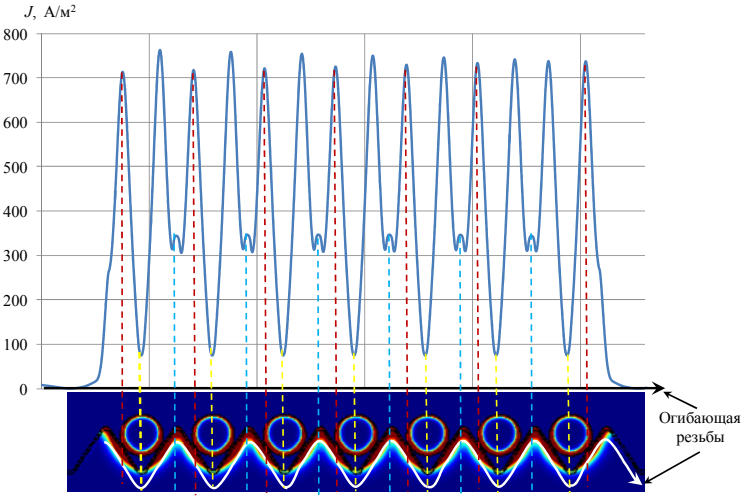


Рис. 4. Распределение поля вихревых токов (вариант 1)

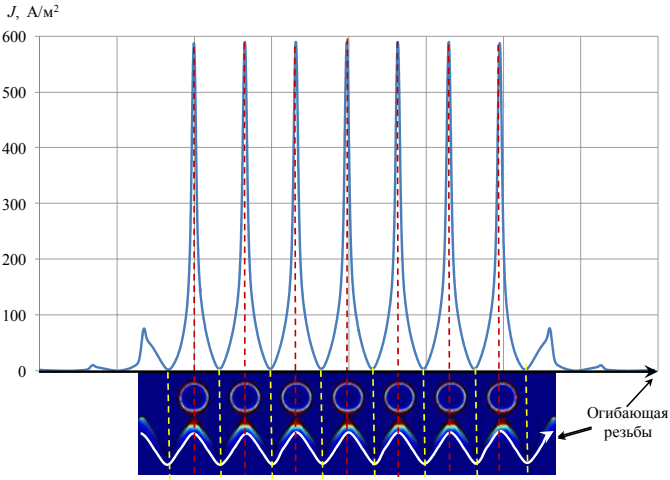


Рис. 5. Распределение поля вихревых токов (вариант 2)

На основании полученных распределений осевой компоненты магнитной индукции системы подмагничивания и поля вихревых токов под поверхностью объекта контроля в соответствии с формулой (1) может быть определена объемная плотность сил Ампера F_A при различных положениях катушки. Графики распределения зависимости

объемной плотности сил Ампера F_A для катушки, вложенной в резьбу, и катушки, расположенной над гребнями резьбы, приведены на рис. 6 и 7 соответственно.

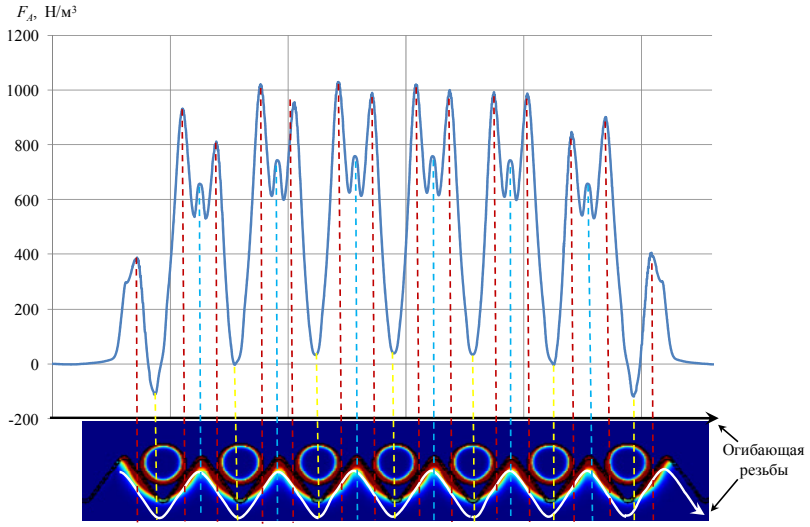


Рис. 6. Объемная плотность сил Ампера (вариант 1)

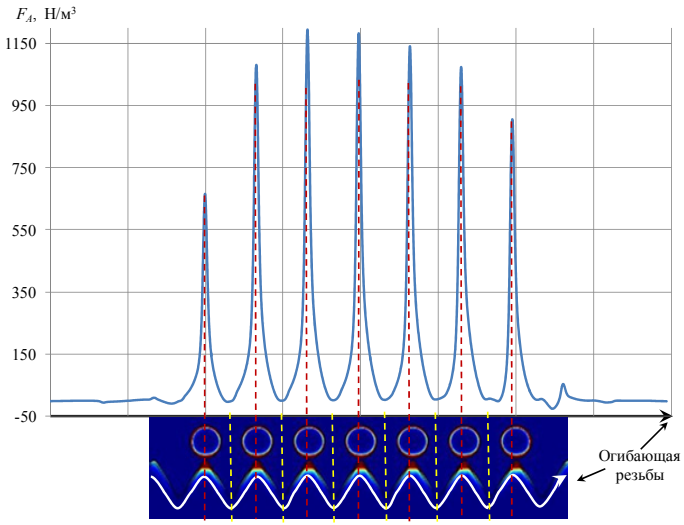


Рис. 7. Объемная плотность сил Ампера (вариант 2)

В случае расположения катушки в резьбе сила Ампера, так же как и распределение вихревых токов, достигает максимальных значений на боковой поверхности резьбы, а также повышается на гребне резьбы за счет достижения максимумов магнитной индукции. В случае расположения катушки над гребнями резьбы сила Ампера, так же как и распределение вихревых токов, имеет четко выраженные максимальные значения на гребнях резьбы.

Выводы

В результате моделирования установлено, что при контроле резьбовых соединений расположение катушки максимально близко внутри витков резьбы позволяет повысить эффективность ЭМА-преобразователя, но при этом основным источником акустического сигнала является боковая поверхность резьбы, что влияет на качество распространения акустического сигнала. Расположение катушки над гребнями резьбы позволяет сконцентрировать источники акустического сигнала в гребнях резьбы и достичь в них большей амплитуды акустического сигнала.

Список литературы

1. *Лаврухин, А. А.* Современные методы контроля резьб труб нефтяного сортамента / А. А. Лаврухин, М. Ю. Прилепко // Измерительная техника. – 2017. – № 1. – С. 28–32.

2. *Лаврухин, А. А.* Обзор резьб и средств измерений к ним // Законодательная и прикладная метрология. – 2016. – №4 (143). – С. 8–11.

3. *Ушаков, В. М.* Состояние и перспективы неразрушающего контроля крепежных изделий фланцевых соединений энергетического оборудования / В. М. Ушаков, Д. М. Давыдов, В. В. Михалев // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 10. – С. 61–66.

4. *Блинов, Д. С.* Особенности контроля средних диаметров наружной резьбы деталей роликовинтовой передачи / Д. С. Блинов, М. И. Морозов // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2014. – № 10. – С. 29–43.

5. *Леун, В. И.* Метрологические и конструктивные особенности принципов построения приборов активного контроля размеров средних диаметров резьб на операциях резьбошлифования / В. И. Леун, Е. В. Николаева // СТИН. – 2014. – № 10. – С. 39–40.

6. *Косарев, В. А.* Определение качества внутренней резьбы при обработке пластическим деформированием / В. А. Косарев, Н. Д. Сугробова // Измерительная техника. – 2013. – № 11. – С. 38–40.

7. *Сясько, В. А.* Вихретоковый неразрушающий контроль резьбы насосно-компрессорных труб / В. А. Сясько, П. В. Соломенчук, М. Ю. Коротеев // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 10. – С. 17–22.

8. *Михалев, В. В.* Опыт ультразвукового контроля шпилек крышек гидроагрегатов ГЭС / В. В. Михалев, Д. М. Давыдов, С. В. Шишкин // Дефектоскопия. – 2011. – № 4. – С. 50–56.

9. *Ушаков, В. М.* Обнаружение трещин под резьбой шпилек энергооборудования и бурильных труб при ультразвуковом контроле / В. М. Ушаков, Д. М. Давыдов, В. И. Давыдова // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 44–48.

10. *Муравьева, О. В.* Метод многократной тени при контроле цилиндрических объектов с использованием рэлеевских волн / О. В. Муравьева, В. А. Зорин // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 3–9.

11. Анализ отражённых сигналов при контроле цилиндрических образцов многократным зеркально-теневым методом / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова, И. В. Булдакова, М. Ю. Соков // Автометрия. – 2016. – № 4. – С. 62–70.

12. *Муравьева, О. В.* Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократно-теневого электромагнито-акустического метода контроля прутков / О. В. Муравьева, М. Ю. Соков // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2016. – № 3 (71). – С. 46–50.

13. Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнито-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка / О. В. Муравьева, К. В. Петров, М. Ю. Соков, М. А. Габбасова // Дефектоскопия. – 2015. – № 7. – С. 17–23.

14. *Муравьев, В. В.* Связь механических свойств пруткового проката из стали 40Х со скоростью объемных и рэлеевских волн / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, К. В. Петров // Дефектоскопия. – 2017. – № 8. – С. 20–28.

15. *Muraviev, V. V.* Non-destructive electromagnetic-acoustic evaluation methods of anisotropy and elastic properties in structural alloy steel rolled products / V. V. Muraviev, O. V. Muravieva, M. A. Gabbasova // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1683. – P. 020156.

O. V. Murav'eva, DSc in engineering, professor
M. Yu. Sokov, postgraduate student
A. S. Zakharov, magister student
E-mail: pmkk@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Modeling of Physical Fields of a Passing Electromagnetic Acoustic Transducer in the Parts Thread

In the article the model of the mechanism of excitation of acoustic waves in products with thread and examined two options for the location of the coils of the inductor relative to the turns of thread.

Keywords: modeling, Amper's force, ultrasonic inspection, EMA, thread inspection

УДК 504.062.4

В. А. Степанов, канд. техн. наук, зав. лабораторией
E-mail: vladimir1@udm.ru
В. В. Белых, канд. техн. наук, доц.
E-mail: bil_ha@mail.ru
Г. В. Ломаев, д-р техн. наук, проф.
E-mail: lomaevgv1@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
Е. В. Кошелева, рентгенолаборант
Республиканская стоматологическая поликлиника МЗ УР, г. Ижевск

Информационно-энтропийные процессы при некролизе пчелы

Установлены информационно-энтропийные процессы при некролизе с разными мерами стабильности: 1) однородное разупорядоченное состояние $A_m < 0{,}213$; 2) дезорганизованное состояние $0{,}213 < A_m < 0{,}618$, с экстремальным повышением энтропии; 3) упорядоченное состояние $0{,}618 < A_m$ с дальним порядком и относительно низкой энтропией. Получена функция и константа подобия устойчивости микрокластеров железа, выражающая генетическую связь спектра информационных резонансов: $\Delta^{1/m} = A_m$. Константа подобия $\Delta = 0{,}22$.

Ключевые слова: энтропия, пчелы, информация, информационный резонанс, адаптация, синергетика, мультифракталы, хаос, порядок, рентген.

Введение

Эволюционное развитие материи связано с процессом накопления информации, при этом все процессы обладают общим свойством: материя переходит из простых и однородных форм в более сложные и дифференцированные, что формирует так называемую стрелу времени [1].

Действие информации, в противоположность энтропии, выражается в тенденции к увеличению упорядоченности и уменьшению неопределенности. Дезорганизация, характеризуемая нарастанием энтропии (беспорядка) в системе, вызванной асимметричностью структуры и нарушением равновесия, – необходимый момент становления и раз-

© Степанов В. А., Белых В. В., Ломаев Г. В., Кошелева Е. В., 2018

вития любой открытой системы. Следовательно, в открытых системах существует информационный компонент, нарастающий в процессе развития, и другой – энтропийный компонент, который понижается (убывает). Само соотношение между информацией и энтропией впервые открыл Л. Сцилард [2]. Преобразования информации лежат в основе фрактального анализа структур различной природы, и на этой базе разработаны методы и компьютерные программы мультифрактальной параметризации плоских изображений для оптимизации фрактальных структур в материалах при технологических процессах и для изучения их устойчивости и адаптационных свойств [3–7].

Информационно-энтропийный анализ (ИЭА) успешно применяется в различных областях биологии, физиологии и медицины [8–9], экологии [10]. Информационная технология обработки оптического изображения с помощью регулярной структуры (квадратная сетка с масштабируемым размером ячейки d) выявляет спектр информационных резонансов и соответствующих им размеров ячейки, а величина энтропии в данном случае служит мерой организованности изучаемого неоднородного множества. Возрастание информации выражает рост упорядоченности и означает, что в структуре становится больше периодической составляющей и что система накачивается информацией (негэнтропией) [11].

Метод ИЭА структуры изображения предполагает исследование зависимости отношения информации (ΔD_{40} –мера скрытой упорядоченности) к энтропии (D_1 –информационной энтропии) от величины меры стабильности структуры [12].

Описание эксперимента и полученные результаты

Собранные пчелы в количестве 10 штук после фиксации парами спирта расположены на спинке и приклеены скотчем на площадки держателя. Объект находился на таком расстоянии от детектора, чтобы обеспечить увеличение, достаточное для рентгенографии. Повторная съемка была через месяц.

В организме пчелы железо присутствует в виде ферритина и кристаллов магнетита. С помощью мультифрактального анализа рентгенограмм пчел получены параметры распределения микрокластеров железа в биосистеме.

Целью работы является изучение распределения микрокластеров железа и закономерностей изменения их адаптивных свойств в теле насекомого при некролизе.

Предметом исследования является пчела и процессы некролиза.

Полученные результаты и обсуждение

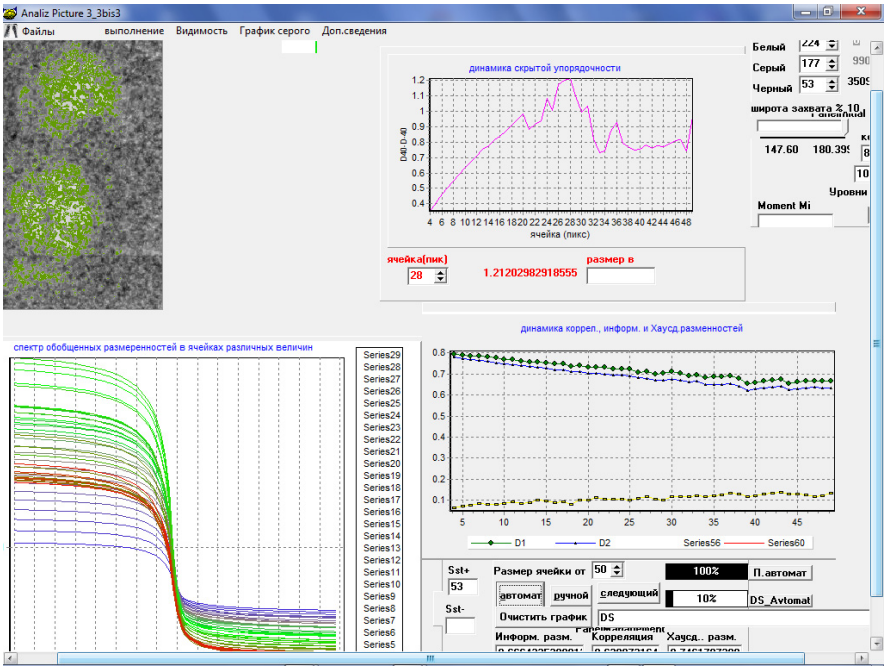


Рис. 1. Интерфейс программы. На диаграмме «Скрытая упорядоченность» наблюдаются резонансы

С позиции синергетики и теории фракталов существует инвариантная к внешней среде генетическая связь спектра самоорганизующихся структур (адаптивных структур), реализуемых данным классом материалов при обмене с внешней средой энергией, веществом и информацией. Поскольку микрокластеры Fe представляют нелинейную динамическую систему, поэтому с помощью мультифрактального анализа рентгенограммы пчелы выявляются информационные резонансы (мультифрактальные множества) и пороговые меры упорядоченности ΔD_n^* и ΔD_{n+1}^* для определения адаптивности структуры в момент перехода системы к хаосу с использованием универсального алгоритма самоорганизации структур адаптации (рис. 1) [4]:

$$\Delta D_n^* / \Delta D_{n+1}^* = \Delta_i^{1/m} = A_m,$$

где ΔD_n^* и ΔD_{n+1}^* – значения мер упорядоченности соседних информационных резонансов, в пределах которых сохраняется один и тот же механизм преобразования информации; Δ_i – мера устойчивости микрокластера Fe; m – показатель периодичности перестройки структуры m = 1, 2, 4, 8, 16; величина A_m выражает меру структурной стабильности.

На рис. 2 представлена экстремальная функция соотношения между информацией и энтропией в зависимости от меры стабильности структуры, ромбиками обозначены результаты сразу после усыпления пчёл, кубиками – после месячного некролиза. Спектры информационных резонансов, полученные сразу после усыпления, дают оценки меры стабильности меньше пороговых значений устойчивости, детерминированных законом золотой пропорции к самоорганизующимся перестройкам (A_m < 0,213). Наблюдаются состояния с монотонным возрастанием упорядоченности и смешанные состояния с информационными резонансами при больших масштабах, что является проявлением однородной с ближним порядком структуры, очевидно, по типу аморфной. Такому разупорядоченному однородному состоянию структуры соответствует низкий уровень энтропии (рис. 3) и превалирование информации над энтропией (рис. 2) вследствие взаимодействия структур железа с белковыми молекулами и создания негэнтропии.

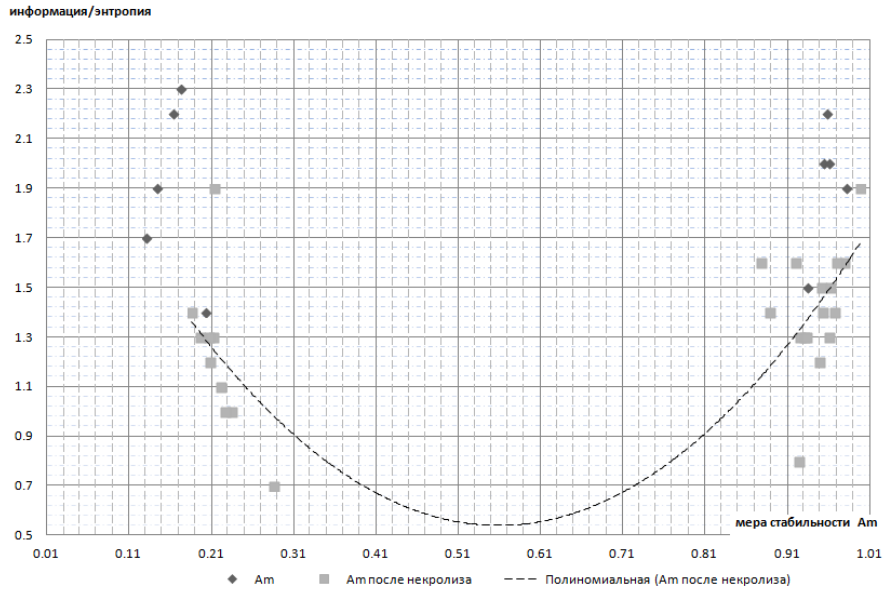


Рис. 2 . Зависимость отношения информация/энтропия от меры стабильности

После некролиза в спектре информационных резонансов исчезают однородные разупорядоченные состояния. Появляются структуры с квазипериодическими процессами самоорганизации с мерами стабильности в пределах от 0,213 до 0,618 и периодическими процессами с мерами стабильности более 0,618. Дезорганизация состояния вследствие разрушения белковых молекул при некролизе сопровождается увеличением энтропии (рис. 3), повышающего устойчивость структуры за счет квазипериодического процесса упорядочения микрокластеров железа. В квазикристаллической структуре имеется дальний порядок. Состояние с периодическими процессами взаимодействия информации и энтропии и мерой стабильности более 0,618 возможно в кристаллических структурах. В процессе некролиза белковых молекул происходит их разрушение с увеличением энтропии, в том числе перераспределение железа с объединением микрокластеров магнетита как следствие возникновения упорядоченного хаоса с дальним порядком. В структуре железа и стали оценка устойчивости микрокластера Fe к водородному охрупчиванию, вне зависимости от химического состава стали, составляет $\Delta = 0{,}11$ [13], следовательно, полученные оценки устойчивости железа на примере Apis M.M $\Delta = (0{,}127 \div 0{,}285)$ говорит о возможной самоорганизации генетического типа.

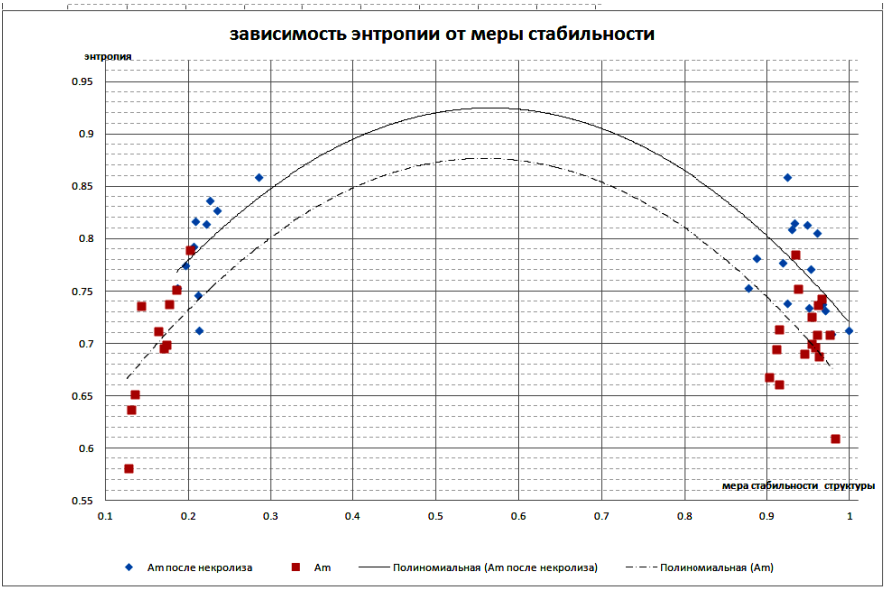


Рис. 3. Зависимость энтропии от меры стабильности

Выводы

– Открытая система с микрокластерами железа, взаимодействуя с магнитным полем Земли, в процессе некролиза образует упорядоченную структуру, вызывающую рост информации и понижение энтропии в виде периодических процессов за счет положительных и отрицательных связей.

– Устойчивость микрокластера Fe в организме пчелы $\Delta = (0{,}127 \div 0{,}285)$.

– Функция и константа подобия устойчивости микрокластеров железа, выражающая генетическую связь спектра информационных резонансов: $\Delta^{1/m} = A_m$.

– Фактор времени приводит к росту меры структурной стабильности, при этом происходит переход от однородного разупорядоченного состояния в первоначальный момент к упорядоченному состоянию через месяц после некролиза пчелы. При этом в структуре пчелы наблюдаются квазипериодические и периодические перестройки, размеры мультифрактальных множеств уменьшаются вдвое, вероятно, за счет распада микрокластеров Fe.

Список литературы

1. *Карери, Дж.* Порядок и беспорядок в структуре материи. – М. : Мир, 1985. – 232 с.

2. *Шамбадаль, П.* Развитие и приложения понятия энтропии : пер. с франц. – М. : Наука, 1967. – 280 с.

3. *Мейен, С. В.* Проблема редукционизма в биологии // Диалектика развития в природе и научном познании. – М. : Наука, 1978. – С. 135–169.

4. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. – М. : Наука, 1994. – 383 с.

5. *Степанов, В. А.* Универсальный механизм информационных преобразований изображений структур материалов различной природы / В. А. Степанов, В. В. Белых // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 231–241.

6. *Степанов, В. А.* Метод картирования результатов фрактального анализа флюорограмм органов грудной клетки человека / В. А. Степанов, В. В. Белых // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. 2017. – С. 310–318.

7. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. Г. Суфиянов, В. В. Белых, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2009. – № 3. – С. 150–154.

8. *Козупица, Г. С.* Информационно-энтропийный подход к определению здоровья / Г. С. Козупица, Ю. Л. Ратис, Е. В. Ратис // Вестник Балтийской академии. – 1999. – Вып 25, № 1. – С. 41–46.

9. *Герасимов, И. Г.* Энтропия биологических систем // Проблемы старения и долголетия. – 1998. – Т. 7, № 2. – С. 119–126.

10. *Сдвигов, А. Б.* Метод биоиндикации экосистем по соотношению адаптивных и инадаптивных потенциалов популяций и биоценозов (информационно-энтропийный аспект) // Методы популяционной биологии : сб. материалов 7-го Всероссийского популяционного семинара. Ч. 1. – Сыктывкар, 2004.

11. Мультифрактальный метод тестирования устойчивости структур в материалах / В. С. Иванова, Г. В. Востовский, А. Г. Колмаков, В. Н. Пименов. – М. : Интерконтакт Наука, 2000. – 54 с.

12. *Степанов, В. А*. Сравнительный фрактальный анализ рентгенограмм осы Vespidae и пчелы Apis для определения особенностей структуры железа и распределения его по телу насекомых / В. А. Степанов, В. В. Белых, Н. В. Степанюк // Магнитные явления : сб. ст. под ред. проф. Г. В. Ломаева. – 2015. – № 5. – С. 80–95.

13. *Савченко, Э. А*. Отклик конструкционной стали на водородное воздействие // Металлы. Изв. РАН. – 1992. – № 4. – С. 202–208.

V. A. Stepanov, CSc in engineering, head of laboratory
E-mail: vladimir1@udm.ru
V. V. Belykh, CSc in engineering, associate professor
E-mail: bil_ha@mail.ru
G. V. Lomaev, DSc in engineering, professor
E-mail: lomaevgv1@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia
E. V. Kosheleva, x-ray laboratory worker
Udmurt Republic Dental Polyclinic, Izhevsk, Russia

Information-Entropic Processes During Necrolysis of a Bee

Information-entropic processes during necrolysis were described with different measures of stability A_m: 1) homogeneous disordered state $A_m < 0.213$; 2) disorganized state $0.213 < A_m < 0.618$, with extreme increase of entropy; 3) the ordered state of $0.618 < A_m$ with far order and relatively low entropy. The function and the constant of similarity of iron microclusters stability, expressing the genetic connection of the information resonances spectrum ($\Delta^{1/m} = A_m$, the constant of similarity $\delta = 0.22$), are obtained.

Keywords: entropy, bee, information, information resonance, adaptation, synergetics, multifractals, chaos, roentgen.

УДК 681.586.54

M. A. Urakseev [1,2], DSc in engineering, professor
E-mail: uma1941@mail.ru
K. V. Vazhdaev [2,3], CSc in engineering, associate professor
E-mail: vazhdaev.k@gmail.com
A. R. Sagadeev [2], postgraduate student
E-mail: one_str@mail.ru
[1] Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia
[2] Ufa Petroleum Technological University, Ufa, Russia
[3]Bashkir State University, Ufa, Russia

Acoustooptical Converter for Distributed Information-Measuring Systems*

The relevance of the present study devoted to the development of an acousto-optic converter for switching fiber-optic communication lines of distributed information-measuring systems is substantiated.

The goal of the work was formulated as the implementation of structural synthesis and the development of a new acousto-optic converter with improved characteristics for switching fiber-optic communication lines, which can be successfully used in telecommunication and distributed information-measuring systems.

As a result of structural synthesis, a new acousto-optical converter was developed with improved characteristics achieved by a combination of design and technological methods.

Keywords: acoustooptical converter, fiber optics, measuring system, commutation of communication lines.

Introduction

1. *The relevance of scientific research.* Increased requirements for modern technological processes, in connection with the need to improve the quality and technical and economic indicators of the products being created, put forward the task of improving the components of control systems, which include converters, sensors, instruments, information measuring and control systems.

In this connection, the present work devoted to the development of an acousto-optic converter for switching fiber-optic communication lines of

© Urakseev M. A., Vazhdaev K. V., Sagadeev A. R., 2018

*The work was supported by the Russian Foundation for Fundamental Research (grant 16-38-50122).

distributed information-measuring systems is relevant. The developed converter allows eliminating the drawbacks of the known similar devices [1], namely, to reduce optical noise and increase the reliability and convenience of operation [2].

2. *The purpose of this study* is to implement structural synthesis and develop a new acousto-optic converter for switching (AOCS) of fiber-optic communication lines (FOCL) with improved characteristics, which can be successfully used in telecommunication and distributed information and measurement systems (IMS). The use of an acousto-optical effect to control the light beam with the help of elastic ultrasonic waves provides a high speed of about 10^{-9} s and high accuracy (an error of the order of 0.1 %) [3–5].

The state of the question and the statement of the research task

There is the AOCS FOCL of distributed IMS [1] containing an input optical fiber, an optical signal collimator comprising a collimating lens, a two-coordinate acoustooptic deflector, a generator for exciting acoustic waves, a lens for focussing the deflected optical signal. For all its advantages, this AOCS has *a number of drawbacks* that limit its use: optical noise caused by optical reflections of the optical signal by the elements of optics, the absence of a housing protecting the AO switch from mechanical damage, which does not exclude the shift of the switch elements relative to each other; inconvenience of operation due to the absence of detachable connections for connection to the switchboard system of the switch.

This AOCS will be adopted as a *prototype.*

The research objective is to implement structural synthesis and to create a new AOCS FOCL that has improved characteristics, allowing to achieve the technical result: reduction of optical noise; increased reliability and ease of use.

The way of solving the task

An acoustooptical converter for switching fiber-optic communication lines of distributed information-measuring systems comprises an input optical fiber, an optical signal collimator comprising a collimating lens, a two-ordinate acoustooptical deflector, an acoustic wave excitation generator, and a lens for focusing the deflected optical signal. Unlike the prototype, the acousto-optic converter contains a collimating lens that is made composite and has a bevelled end surface, an optical signal collimator and output optical fibers. They have detachable connections, and the acousto-optic converter system is placed in a closed housing.

The obtained result

As a result of the implementation of structural synthesis, a new AOCS was developed, free from the drawbacks inherent in the prototype.

AOCS FOCL with output optical fibers, which are assembled into a fiber-optic cable and terminated by FC connectors, is shown in Figure 1.

Figure 2 shows the structural scheme of the FOCA FOCL. The structural diagram of the AOCS FOCL is shown in the Figure 2.

The AOCS system is mounted in a closed case 1, which protects the converter parts from mechanical influences and damages. The input optical fiber 2 is connected to a collimator 3 fixed in the holder 4 on the side panel 5 of an acousto-optic converter for switching fiber-optic communication lines (Fig. 1). The collimator 3 is optically conjugated to the two-coordinate acousto-optical deflector 6 by means of a beam of collimated light 8 (Fig. 2). The collimator 3 consists of two lenses, in which a plano-convex lens 9 and a bevelled lens 10 are used, which provides low back reflections of the optical signal. The polarizer 11 is mounted so that the polarization plane of the collimator can be corrected by the manual correction mechanism of the polarization plane (not shown) located on the case of the collimator 3. A two-channel generator 12 located in the housing of the acousto-optic converter for switching fiber-optic communication lines 1, is designed to form a sinusoidal-long frequency-modulated signal when the two-channel generator of the control digital code is fed to input 13 (Fig. 1).

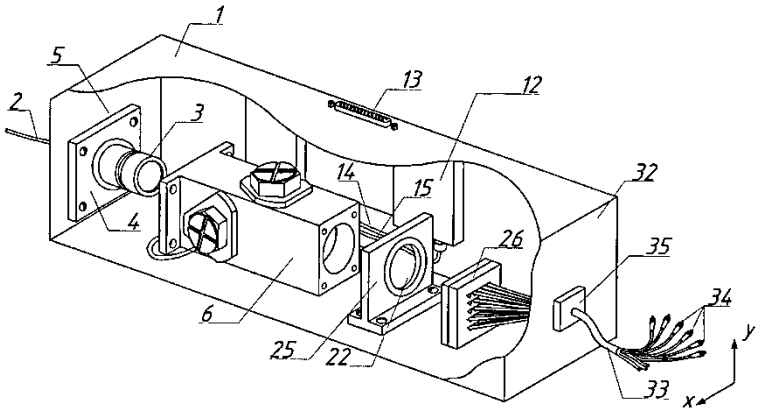


Fig. 1. Construction of AOCS FOCL: *1* – closed case; *2* – input optical fiber; *3* – collimator; *4* – holder; *5* – side panel; *6* – acousto-optical deflector; *12* – two-channel generator; *13* – electric signal input; *14*, *15* – generator output channels; *22* – focusing lens; *25* – optical holder; *26* – array of collimators; *32* – end panel; *33* – fiber optic cable; *34* – FC connectors; *35* – optic cable clamp

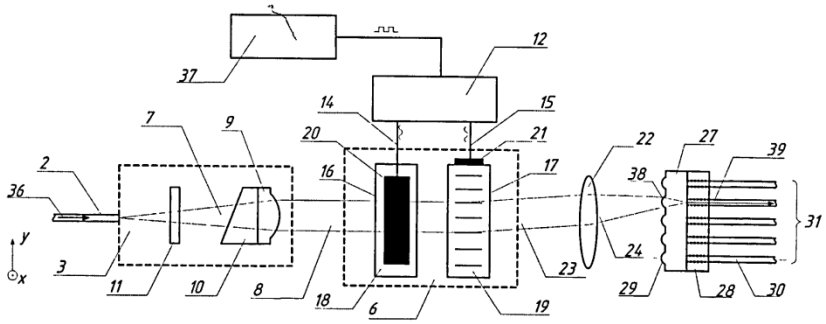


Fig. 2. Structural scheme of AOCS FOCL: *2* – input optical fiber; *3* – collimator; *6* – acousto-optical deflector; beam; *7* – polarized light beam; *8* – beam of collimated light; *9* – plano-convex lens; *10* – bevelled lens; *11* – polarizer; *12* – two-channel generator; *14*, *15* – generator output channels; *16*, *17* – acousto-optic deflectors; *18*, *19* – paratellurite TeO_2 crystals; *20*, *21* – piezoelectric transducers; *22* – focusing lens; *23* – collimated optical signal; *24* – converging light beam; *25* – optical holder; *26* – array of collimators; *27* – array of microlenses; *28* – fiber optic array; *29* – microlens; *30* – optical fiber; *31* – output fibers; *38* – microlens; *39* – output optical fiber

The two-channel generator 12 has two independent output channels 14, 15 for generating electric frequency-modulated signals input to the acousto-optic deflectors 16, 17. Each of the acoustooptical deflectors is made of optically active paratellurite TeO_2 crystals 18, 19 connected to piezoelectric transducers 20, 21 respectively. The focusing lens 22 serves to convert the deflected collimated optical signal 23 into a converging light beam 24. The focusing lens is designed as a lens mounted in the optical holder 25. The fiber optic array of collimators 26 is an array of microlenses 27 and a fiber optic array 28, connected together.

Each pair of "microlens 29-optical fiber 30" (Fig. 2) is arranged coaxially with respect to each other and periodically located within the fiber-optic array of collimators 26.

The output fibers of the 31 optical fiber array of the collimator 26 are output to the end panel 32 of the housing, 1 (Fig. 1) and assembled into a fiber optic cable 33 (Fig. 2), each fiber terminated by the FC connectors 34. Such an AOCS FOCL will provide optical switching with a large number of output optical fibers. The output optical fibers of the fiber optic array of collimators will be fixed within the housing of the acousto-optical converter for commutation of the fiber-optic communication lines 1 due to the fiber optic cable clamp 35 located on the end panel 32 of the AOCS FOCL body 1. The input of the device is fed an optical signal 36, and the

process of optical signal conversion is controlled by the computer 37. The output optical signal is generated by the microlens 38 and fed to the output optical fiber 39.

Functioning of AOCS FOCL

The optical signal 36 is transmitted over the optical fiber 2 (Fig. 2), which is a single-mode fiber connected to the collimator 3. The divergent beam of light is projected onto the polarizer 11 mounted in the collimator body 3. Since the optical fiber 2 transmitting the optical signal 36, single-mode fiber, such an optical fiber does not retain the polarization plane, but rotates it in any order, so the polarizer 11 is mounted so that the deflected signal 23 is projected onto the focusing lens 22 with its Maximum Feed intensity. The polarization plane of the polarizer 11 can be mechanically corrected by a mechanism located on the casing of the collimator 3.

The polarized beam of divergent light 7 after passing through the polarizer 11 is expanded to the required diameter and projected onto a composite lens 9 that converts the divergent beam of light into a parallel radiation stream 8. The angled side of the lens 10 reduces the back reflections of the collimator 3.

The optical signal expands to match the diameter of the input beam 36 to the aperture of the two-coordinate acousto-optic deflector 6.

The collimated optical signal 8 is projected onto a two -coordinate acoustooptical deflector 6 at an angle in the range 87 ° -89 °, satisfying the Bragg diffraction condition.

The two-coordinate acousto-optical deflector 6 deflects the optical signal 8 in two planes. The deviation of the optical signal by the two-coordinate acousto-optic deflector 6 is controlled by a two-channel oscillator 12 controlled by a computer 37 which supplies a digital code corresponding to the selected output fiber of the optical fiber array of the collimators 26. A digital code is converted by a two-channel generator 12 into a pair of frequency-modulated sinusoidal signals corresponding to the angles of deviation of the acoustooptical deflectors 16 and 17 in two planes.

Each output channel of the two-channel generator is connected by a control line 14, 15 to piezoelectric transducers 20 and 21 of acoustooptical deflectors 16 and 17, respectively. They generate an acoustic wave that propagates in the active crystal of paratellurite 18 in the forward and backward directions, forming a standing wave. The frequency of the acoustic wave in the active deflector crystal will be proportional to the frequency of the frequency-modulated electric signal.

Thus, the crystals 18, 19 of the acoustooptical deflectors 16 and 17 are converted into a Bragg diffraction grating with a controlled diffraction angle. Since the two acoustooptical deflectors 16 and 17 are mounted in the housing of the two-coordinate acousto-optic deflector 6 at right angles, the diffraction angles of these two crystals will also be at right angles. The optical signal 8 is deflected by the first acousto-optical deflector 16 in the X direction and the second acousto-optical deflector 17 in the Y direction by a predetermined angle.

The optical signal 23 deflected in two planes by the two-coordinate acousto-optical deflector 6 is projected onto the focusing objective 22 which converts the deflected collimated beam 23 into a converging light beam 24. This beam narrows to the required diameter and is projected onto the microlens 38 of the fiber optic array of the collimators 26. The output the optical fiber 39 is at a focal length from the corresponding microlens 38. Thus, the optical signal is finally focused into the output fiber. Thus, the input fiber 40 will be connected to the desired output fiber 39 of the fiber optic array of collimators 26.

If it is required to connect the input optical fiber 36 to another optical fiber of the optical fiber array of the collimators 26, the frequencies of the electrical signals will be changed by the two-channel oscillator 12 to change the deflection angle of the acousto-optical deflectors 16 and 17.

Technological ways to solve the assigned tasks

The solution of the assigned task was achieved due to:

- the use of optics, providing a lower level of reverse reflections and a higher level of positioning of the optical signal;
- installation of the system of the claimed device and its elements in a closed case;
- the presence of optical and electrical detachable connections for connection to the system AOCS FOCL.

Conclusion

1. The relevance of scientific research devoted to the development of an acousto-optic converter for switching fiber-optic communication lines of distributed information-measuring systems is shown.

2. The goal of the present study is formulated as the implementation of structural synthesis and the development of a new acousto-optic converter that has improved characteristics for the commutation of fiber-optic communication lines, which can be successfully used in telecommunication and distributed information and measurement systems.

3. The study of the state of the matter was carried out and the aim of the research was set. As the prototype, an acousto-optical transducer was selected for switching fiber-optic communication lines in accordance with US Pat. No. 6,539,132, MPC G02F1 / 335. Its shortcomings are revealed: optical noise caused by back reflections of an optical signal by elements of optics; absence of protective housing; inconvenience of operation and lack of reliability.

4. As a result of the implementation of structural synthesis, a new acoustooptic converter was developed, which eliminated the drawbacks of the prototype. A design and a block diagram of the converter have been developed. Improvement of the characteristics of the converter is achieved due to technological and constructive methods.

References

1. Acousto-optic switch for fiber optic lines, US Patent #6539132 B2, G02F 1/335 / Ivtsenkov G., Narver V., Magdich L., Solodovnikov N. – Claimed: 22.02.2001. – Published: 25.05.2003.

2. Acoustooptical converter for switching fiber-optic communication lines of distributed information-measuring systems. Patent of Russia #130418, G02F 1/335 / Urakseev M. A., Davydov A. I., Mukhamadiev A. A. – Claimed: 09.01.2013. – Published: 20.07.2013. Bul. #20.

3. *Udd, E.* Fiber-optic sensors. An Introduction for Engineers and Scientists. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.

4. *Jackson, R. G.* Novel Sensors and Sensing. – IOP Publishing Ltd. – 2004.

5. *Fraden, J.* Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications. – Springer-Verlag New York. – 2016.

УДК 620.179.16

И. А. Швалев, магистрант
Л. В. Волкова, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Экспериментальные исследования анизотропии листов с использованием волн Лэмба*

Описана методика исследование анизотропии металла ультразвуковым методом контроля с применением волн Лэмба. Был проведен эксперимент, по результатам которого построены эпюры распределения скоростей волн и коэффициента анизотропии.

Ключевые слова: ультразвук, волны Лэмба, анизотропия.

Введение

Штамповка и вытяжка материла влечет за собой ряд требований, которые должны выполняться во избежание неравномерной вытяжки листа, которая в свою очередь может привести к образованию трещин. Поэтому контроль свойств проката листов является приоритетным.

Эксплуатация изделия сопровождается механическими нагрузками, постоянное воздействие которых может вести к изменениям в структуре материала и проявлению дефектов, несовместимых с дальнейшей эксплуатацией. При производстве изделий из листового проката неизбежно появления брака, одной из причин этого является анизотропия механических свойств листа. Упругая и механическая анизотропия имеют схожие свойства, поэтому появляется возможность контроля анизотропии ультразвуковым методом.

Неразрушающие методы контроля анизотропии листового проката основаны на различии физических свойств материала в разных направлениях. Коэффициент механической анизотропии сопоставим с коэффициентами упругой и магнитной анизотропии [1–5].

© Швалев И. А., Волкова Л. В., 2018

*Исследование выполнено при подержке гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00051).

Сведения из теории

Для определения упругой анизотропии тонких металлических листов целесообразно использовать волны Лэмба, скорость которых изменяется от направления проката металла. Для расчета скорости волны C использовалась формула, учитывающая время прохождения волны по объекту контроля t и время распространения волны в призме $t_{\text{п}}$:

$$C = \frac{l}{t - t_{\text{п}}}, \tag{1}$$

где l – длина измерительной базы, t – время пробега акустической волны от источника к приемнику, $t_{\text{п}}$ – время в призме преобразователя.

Для определения времени в призме использовался образец СО-3, который аттестуется по времени пробега поперечных волн. По ГОСТ Р 55724-2013 [6] время пробега поперечных волн от центра образца до его боковой поверхности и обратно составляет 33,7 мкс.

Расчет коэффициента анизотропии K_A производился по формуле

$$K_A = \left(1 - \frac{C_\alpha}{C_{\max}}\right) \cdot 100\,\% \tag{2}$$

где C_α – скорость распространения волны Лэмба в положениях от 0 до 360°, $C_{\max}$ – максимальная скорость волны Лэмба в листе.

Описание эксперимента

Для оценки анизотропии стальных листов была использована экспериментальная установка (рис. 1). Принцип действия заключается в следующем: в листовом прокате (ОК) *4* с помощью пьезопреобразователя *2* возбуждаются акустические импульсы, которые после прохождения в ОК регистрируются приемным преобразователем *3*, преобразующим акустические колебания в электрические импульсы, которые регистрируются дефектоскопом *1*, где они сохраняются и в дальнейшем обрабатываются.

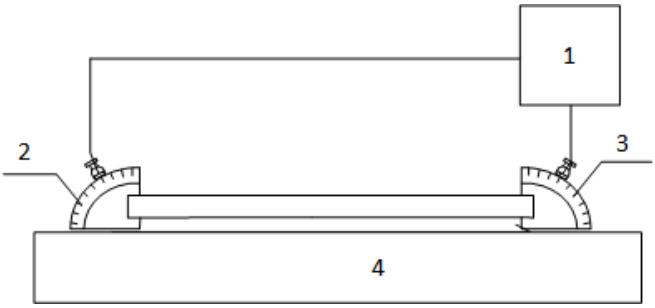


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения измерений: *1* – универсальный дефектоскоп, *2* – излучающий ПЭП, *3* – принимающий ПЭП, *4* – объект контроля

На исследуемом образце расчерчивается шаблон – круг с градуировочной шкалой с шагом 10, радиус круга равен расстоянию между двумя преобразователями (рис. 2). При установке на объект контроля центр фиксирующейся каретки системы ПЭП должен располагаться по центру шаблона.

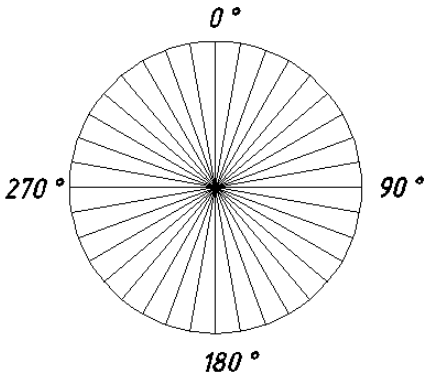


Рис. 2. Схема шаблона для измерения анизотропии

Регистрация и сохранение принятого сигнала производилась с использованием дефектоскопа DIO1000, который позволяет сохранять результаты с частотой дискритезации 200 МГц.

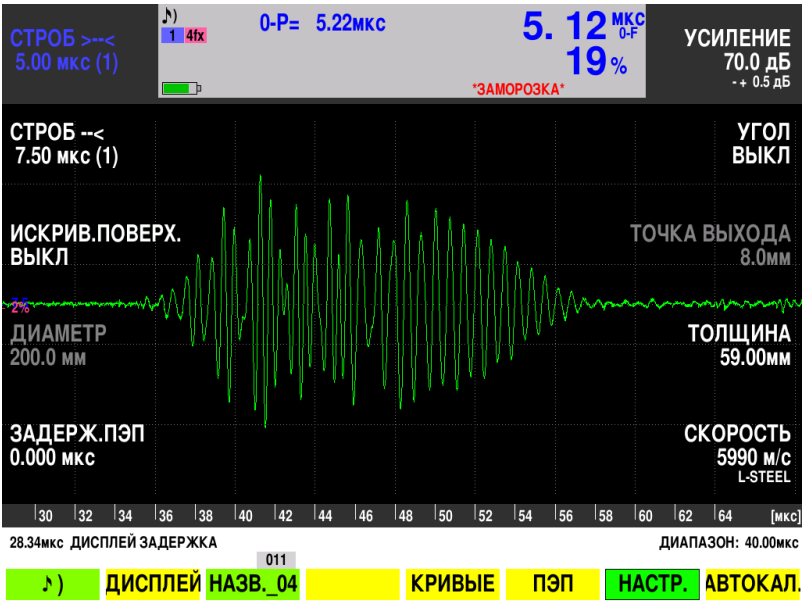


Рис. 3. Полученный сигнал с дефектоскопа DIO 1000

Для повышения точности обработки сигнала был поизведен корреляционный анализ с использованием программы WinПОС, который применялся для двух сигналов: измеренного в нулевом положении и сигнала под каждым последующим углом.

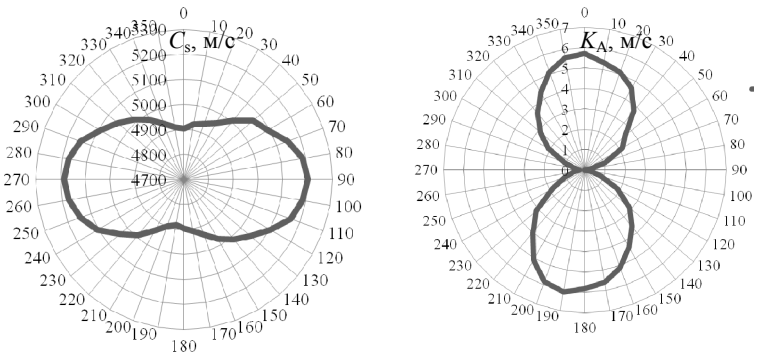
Результаты и их обсуждение

Проведение исследований производилось с помощью преобразователей с частотой 1,8 и 2,5 МГц с целью поиска условий, удовлетворяющих более точным измерениям и оптимальной чувствительности. Для каждого преобразователя были рассчитаны углы возбуждения волны Лэмба симметричной *S* или антисимметричной *A* моды, теоретиеские значения скоростей для датнных типов волн. Эксперименты были проведены на шести листах различной толщины, результаты измерений приведены в таблице.

По результатам проведенных экспериментов были построены эпюры распределения скоростей волн Лэмба в зависимости от направления проката и эпюры распределения коэффициентов анизотропии (рис. 4).

Результаты исследования

Рассчитанные скорости, м/с	Рассчитанные углы ввода, град.	Частота преобразователей *f*, МГц	Образец, №	Толщина листа, мм	Значение	Положение оси преобразователей, град.	Скорость, м/с	Мода
5284	30	1,8	1	3,0	Max	90	4827	S_1
					Min	190	4560	
			2		Max	90	4723	
					Min	190	4568	
			3		Max	90	5201	
					Min	190	4885	
			6		Max	300	4898	
					Min	20	4795	
5549	29		4	3,7	Max	270	5288	S_2
					Min	350	5012	
			5		Max	280	5438	
					Min	0	5160	
3964	42		3	3,0	Max	270	3784	A_1
					Min	0	3671	
4232	39	2,5	3	3,0	Max	90	4229	S_1
					Min	170	4042	
4546	36		4	3,7	Max	280	4572	A_2
					Min	180	4384	



а *б*

Рис. 4. Эпюры распределения скоростей волны Лэмба (*а*) и коэффициента анизотропии (*б*) в листе № 3 (мода *S*1)

Из эпюр распределения видно, что максимум скорости волны Лэмба наблюдается поперек направления проката, а коэффициент упругой анизотропии имеет максимум вдоль направления проката, а поперек имеет минимальное значение. По полученным зависимостям можно производить оценку появления анизотропии листового проката.

Выводы

По проведенным исследованиям анизотропии тонколистового проката были построены эпюры распределения скоростей и коэффициента анизотропии в зависимости от направления проката.

Из эпюр распределения определены максимумы и минимумы ско-ро-стей волн Лэмба в металлическом листе и коэффициенты анизотропии.

Установленно, что коэффициент анизотропии имеет максимальные значения под углом 0 и 180°.

Список литературы

1. *Матюк, В. Ф.* Состояние неразрушающего контроля штампуемости листового проката сталей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 3 – С. 15–42.

2. *Муравьев, В. В.* Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, Е. Н. Кокорина // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 4 – С. 66–70.

3. Методика определения акустических структурных шумов металла / В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, А. В. Байтеряков, Д. И. Дедов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 143–148.

4. *Мазур, В. Л.* Предупреждение дефектов листового проката / В. Л. Мазур, А. И. Добронравов, П. П. Чернов. – Киев : Техніка, 1986. – 141 с.

5. *Петров, Ю. В.* Лазерная генерация волн Лэмба в ферромагнитной металлической пластине / Ю. В. Петров, С. В. Гуревич // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – № 22. – С. 84–86.

6. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – М. : Стандартиформ, 2014. – 24 с.

I. A. Shval'ev, magister student
L. V. Volkova, CSc in engineering, associate professor
E-mail: ludmila396@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Experimental Research of the Anisotropy of Sheets Using Lamb Waves

A technique for the investigation of the anisotropy of a metal by ultrasonic inspection using Lamb waves is described. An experiment was carried out based on the results, which were used to plot the distribution of wave velocities and the anisotropy coefficient.

Keywords: ultrasound, Lamb waves, anisotropy.

УДК 621.317.7

Е. Ю. Шелковников, д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией
E-mail: evshelk@mail.ru
А. И. Кириллов, мл. науч. сотрудник
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
М. П. Кожевников, А. В. Матросов, магистранты
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Разработка информационно-измерительной системы для диагностики твердых тканей зуба

В статье выполнен анализ современных методов диагностики кариозных поражений твердых тканей зуба. Обоснован выбор перспективного электрометрического метода для создания информационно-измерительной системы, позволяющей в автоматизированном режиме осуществлять диагностику твердых тканей зуба. Приведена структурная схема разработанной системы, рассмотрены принципы ее работы.

Ключевые слова: электропроводность, биологическая ткань, экспресс-диагностика, твердые ткани зуба, кариес.

Введение

Кариес зубов – сложный, медленно развивающийся и медленно текущий патологический процесс в твердых тканях зуба, характери-

© Шелковников Е. Ю., Кириллов А. И., Кожевников М. П., Матросов А. В., 2018

зующийся деминерализацией и разрушением тканей зуба с образованием дефекта [1]. Кариес является ключевой и исключительно важной в практическом отношении проблемой стоматологии, а широкое распространение среди населения определяет его социальное значение [2]. Ранняя диагностика кариеса имеет первостепенное значение в стоматологии, т. к. ранние кариозные поражения можно приостановить и в некоторых случаях добиться их реминерализации [3].

Для выявления кариеса зубов применяются так называемые скрининговые обследования – те, которые могут использоваться для массового обследования благодаря своей безопасности и простоте проведения. К ним относятся осмотр, зондирование, пальпация, высушивание и прочие. Очевидно, что, ограничившись только этими методами, нельзя выявить ранние кариозные поражения, особенно на плохо доступных поверхностях. Поэтому возникает необходимость применения дополнительных, в том числе аппаратурных методов диагностики кариозной болезни. Известные современные устройства не позволяют регистрировать часть важных параметров и обладают низкими функциональными возможностями. Таким образом, разработка надежного и недорогого устройства для получения качественного результата ранней диагностики кариозного процесса является актуальной задачей.

Анализ существующих методов диагностики кариеса

Аппаратурные методы диагностики кариеса основываются на интерпретации физических сигналов. Рассмотрим наиболее широко применяемые диагностические методы для обнаружения и оценки кариозных поражений, при этом из рассмотрения исключим инвазивные методы, в частности, рентгенографию и лабораторные методы.

Люминесцентное исследование – метод, основанный на применении ультрафиолета. Исследуется отраженный от поверхности зуба свет. Неповрежденная эмаль светится бело-голубоватым светом, а при наличии кариозного процесса отмечается сниженное свечение на фоне здоровой эмали [4]. Данный метод используют для определения краевого прилегания пломб и распознавания начального кариеса. К недостаткам метода можно отнести следующие: требуется затененное помещение; обследуется только внешняя поверхность зуба; диагноз ставится на основе субъективного визуального наблюдения; для усиления эффекта свечения применяют дополнительную обработку флуоресцентным веществом; некоторые лекарственные препараты местного применения могут давать свечение, что может привести к ложному результату.

Метод лазерной флюоресцентной диагностики работает следующим образом. Под воздействием лазерного луча малой мощности (до 50 мВт) от источника красного излучения (633 нм) на поверхности зуба образуется флуоресценция в широком спектральном диапазоне (600–1000 нм), которая улавливается фотодетектором. Полученные данные обрабатываются специальным программным обеспечением на компьютере и отображаются в виде спектра или же в самом приборе, который отображает цифровые значения и издает звуковые сигналы. Кариозный процесс вызывает изменение оптических свойств твердых тканей зуба, которые при этом флюоресцируют световыми волнами другой длины. Метод позволяет выявить изменения структуры эмали и применяется для диагностики начальных форм заболевания, а также для оценки эффективности ремтерапии или для определения тщательности обработки полости перед наложением пломбы. Метод позволяет проводить исследование любых участков зубных рядов (в том числе труднодоступных) и поверхностей зуба у взрослых и детей [4–5]. Недостатки метода: высокая стоимость аппарата; необходимость подключения к компьютеру; перед каждой серией измерений необходимо проводить тестирование и калибровку.

Метод количественной световой флюоресценции – метод, основанный на возникновении флуоресценции тканей зуба под действием голубого света (370 нм) от газоразрядной лампы. Данный метод немного отличается от предыдущего. Здоровый зуб флюоресцирует обычным светом, а патологическая микрофлора аутофлюоресцирует в красном диапазоне. Используемый свет проникает сквозь эмаль, но не просвечивает зуб насквозь. Благодаря призменному строению эмали, свет распространяется по ней как по оптическому волокну. Устройство включает в себя цифровую фотокамеру и специализированную оптику, с помощью которых просматриваются скрытые полости. Далее цифровое изображение передается на компьютер и обрабатывается [6]. Метод обладает схожими недостатками: высокой стоимостью аппарата; необходимостью подключения к компьютеру, а также сложной, высокотехнологической структурой.

Метод трансиллюминации основан на том, что ткани зуба обладают различным светопоглощением на просвет. По наблюдаемому тенеобразованию при прохождении яркого потока света от лампы оценивается состояние тканей зуба. Исследование проводят в темном помещении. Свет равномерно проходит через твердые ткани. Поражения выделяются областями, принимающими вид от нечеткой темной тени

до четких коричневых полусфер. Методом обнаруживаются признаки поражения кариесом, в том числе «скрытые» кариозные полости. Метод наиболее информативен при использовании в области фронтальных зубов. Трансиллюминацию можно применять для диагностики кариеса, пульпита, выявления трещины эмали и отложения поддесневого зубного камня, а также для контроля качества подготовки полостей к пломбированию [3]. Данный метод также не лишен недостатков: требуется темное помещение; наличие налета или изменение цвета поверхностных слоев эмали может сильно исказить результаты исследования; метод позволяет определить не только величину дефектов, но и их глубину.

Электроодонтодиагностика (ЭОД) – метод исследования электровозбудимости, при котором определяется порог чувствительности пульпы, что отражает ее жизнеспособность. ЭОД дает представление не столько о состоянии самой пульпы зуба, сколько характеризует целостность и функциональность ее чувствительного нервного аппарата. Применение электрического тока основано на факте, что живая ткань приходит в состояние возбуждения под влиянием раздражителя. При постепенном увеличении силы тока определяется такое минимальное значение, при котором возникают легкие покалывания. Здоровые зубы реагируют на малые токи. По мере прогрессирования и углубления кариозной полости в пульпе происходят необратимые изменения, приводящие к снижению чувствительности нервных рецепторов. Снижение электровозбудимости свидетельствует о наличии воспалительного процесса [7]. Основным недостатком метода является значительное ограничение его применения из-за негативного влияния электрического тока на здоровье некоторых групп пациента. Так, проведение исследования с помощью ЭОД полностью исключено в следующих случачх: когда у пациента стоит кардиостимулятор; гипертоническая болезнь; имеются расстройства психики; электрический ток не переносится по тем или иным причинам; пациенту меньше 5 лет. Нередки случаи, когда есть вероятность получения ложного результата: нервозность; повреждение нервов, вызывающее чрезмерную чувствительность; наличие коронки на зубе; наличие пломб из амальгамы; трещина корня; потеря чувствительности при действии анестезии; при обострениях хронических форм пульпита [8].

Электрометрический метод позволяет измерить в мкА величину электрического тока, проходящего через исследуемую зону (границу пломба – зуб). При наличии дефекта краевого прилегания, трещины

или кариозного дефекта изменяется сила тока – это связано с тем, что эмаль и дентин при возникновении кариозного процесса теряют свои изоляционные свойства. Так как наличие дефекта сопровождается уменьшением сопротивления, то показатели электрометрии возрастают [3].

Разработка информационно-измерительной системы на основе электрометрического метода диагностики твердых тканей зуба

Анализ показал, что наиболее перспективным методом для ранней диагностики твердых тканей зуба является метод электрометрии. Главным его достоинством является то, что метод не основан на субъективных реакциях пациента (боль и пр.). Метод позволяет с минимальными временными затратами проводить объективную экспресс-диагностику стадии кариозного процесса (интактная эмаль, начальный кариес, средний и т. д.). Сам прибор является относительно простым, надежным и недорогим устройством. Применение современных микроконтроллеров и программного обеспечения позволит расширить функциональные возможности прибора, а именно реализовать хранение, обработку и визуализацию результатов измерений.

Анализ применяемых в России в современной стоматологической практике приборов (СтИЛ» и «ДентЭст») для электрометрической диагностики показал, что они обладают рядом серьезных недостатков [8, 9]:

– при измерении малых токов, соизмеримых с допустимой погрешностью аппаратов, имеется вероятность поставить ошибочный диагноз;

– для оценки электропроводности твердых тканей зуба осуществляют измерение только величины тока, протекающего через зуб, а напряжение между электродами не измеряется;

– измерения осуществляются по постоянному току, поэтому необходимо учитывать и исключать емкостную составляющую (биоемкость) тканей, которая возникает между активным и пассивным электродами.

Необходимо отметить, что в полости рта пациента также может возникать разность потенциалов до 60 мВ [10]. На рис. 1 приведена эквивалентная электрическая схема биологической ткани (R_1 – сопротивление межклеточной жидкости; R_2 – сопротивление внутриклеточной жидкости; C – емкость мембраны клетки) [11].

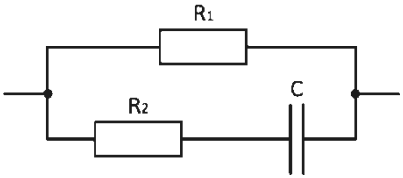


Рис. 1. Эквивалентная схема биологической ткани

При этом наличие потенциала возможно только в случае заряженной емкости *C*. Это обусловлено биохимическими процессами в биологических тканях (в полости рта и т. д.). Из-за наличия активной и реактивной составляющей импеданса измерения необходимо проводить либо на переменном токе, либо на постоянном – со сменой полярности. В обоих случаях необходимы два измерительных канала: по току и напряжению.

Таким образом, для разработки информационно-измерительной системы для диагностики твердых тканей зуба наиболее целесообразно использовать электрометрический метод, при этом необходимо иметь каналы измерений как по току, так и по напряжению. В результате была разработана электрометрическая информационно-измерительная система (ЭИИС), структурная схема которой представлена на рис. 2 (ПЭ, АЭ – пассивный и активный электроды соответственно; МП – микропроцессор; ИТ – источник тока; *R* – нагрузка; ДУ – дифференциальный усилитель; $УС_1$, $УС_2$ – усилители; $АЦП_1$, $АЦП_2$ – аналого-цифровые преобразователи; ПТН – преобразователь ток – напряжение; ПКл – переключатель; СПД – средства передачи данных).

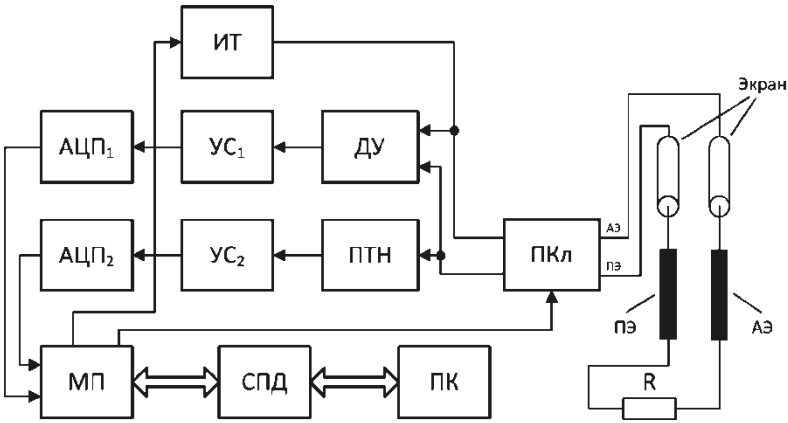


Рис. 2. Структурная схема информационно-измерительной системы для диагностики твердых тканей зуба

ЭИИС функционирует следующим образом. Пассивный и активный электроды ПЭ и АЭ размещают в полости рта согласно методике «Электрометрический метод определения электропроводности твердых тканей зубов», разработанной авторами Г. Г. Ивановой и В. К. Леонтьевым [12]. Необходимо отметить, что повторяемость результатов измерений обеспечивается одинаковым объемом капли раствора, которая дает надежный контакт с исследуемым зубом за счет смачивания его поверхности.

Далее измерения осуществляются автоматически по командам микропроцессора МП. Экранирующие оплетки (экран) защищают сигнальные провода от внешних помех. Источник тока ИТ по сигналу МП выдает стабилизированный ток через нагрузку R, величина которого меньше 100 мкА. Это необходимо, чтобы не вызывать болезненных ощущений у пациента [13]. Осуществляется измерение напряжения U_1 и тока I_1 через первый (дифференциальный усилитель ДУ, усилитель $УС_1$, аналого-цифровой преобразователь $АЦП_1$) и второй (преобразователь ток – напряжение ПТН, усилитель $УС_2$, аналого-цифровой преобразователь $АЦП_2$) измерительные каналы, соответственно. Далее с помощью переключателя ПКл изменяется полярность электродов и выполняется аналогичное измерение напряжения U_2 между АЭ и ПЭ и тока через нагрузку I_2. Необходимо отметить, что реальный ИТ не может генерировать бесконечно большое напряжение как идеальный ИТ. В связи с этим реальный ИТ при некотором максимальном выходном напряжении перестает стабилизировать ток и он начинает уменьшаться. Это обуславливает введение в схему ЭИИС измерительного канала для тока. Электропроводность нагрузки $\rho_н$ вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_н = \frac{I_1 + I_2}{U_1 + U_2}. \quad (1)$$

Значение электропроводности $\rho_н$ соответствует одной из стадий кариозного процесса: интактная эмаль, предкариозное состояние, начальный кариес, поверхностный кариес, средний кариес или глубокий кариес.

Заключение

Таким образом, разработана электрометрическая информационно-измерительная система, позволяющая выполнять экспресс-диагностику твердых тканей зубов с повышенной точностью за счет применения усо-

вершенствованного электрометрического метода проведения измерений. Поскольку модификация метода измерений электропроводности зуба повлекла введение дополнительного измерительного канала для измерения напряжения между активным и пассивным электродами, то необходимо проведение клинического исследования разработанной ЭИИС для накопления статистки и коррекции таблицы стадий кариозного процесса. Следует отметить, что наличие в системе современного микропроцессора позволяет хранить, обрабатывать и передавать информацию на другие устройства, например, в персональный компьютер. В перспективе это позволит не только использовать ЭИИС по прямому назначению, но и проводить на его основе комплексные научные исследования.

Список литературы

1. *Николаев*, *А. И.* Практическая терапевтическая стоматология / А. И. Николаев Л. М. Цепов. – М. : МЕДпресс-информ, 2008. – 960 с.

2. *Лукиных*, *Л. М.* Кариес зубов (этиология, клиника, лечение, профилактика). – Н. Новгород : Изд-во НГМА, 2001. – 186 с.

3. *Пустовойтова*, *Н. Н.* Современные подходы к диагностике кариозной болезни / Н. Н. Пустовойтова, Л. А. Казеко. – Минск : БГМУ, 2010. – 44 с.

4. Современные подходы к диагностике кариозной болезни / В. Ф. Михальченко, Л. И. Рукавишникова, Н. Н. Триголос, А. Н. Попова. – М. : Джангар, 2006. – 104 с.

5. Лазерная флуоресцентная диагностика в медицине, пищевой промышленности, экологии / М. Т. Александров, А. А. Воробьёв, Е. П. Пашков, М. В. Филатов, И. М. Мищенко, Г. В. Багранова // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2003. – № 3 (45). – С. 54–59.

6. *Махкамова, Ф. Т.* Современный взгляд на распространенность, возможность ранней диагностики кариеса зубов у детей [Электронный ресурс] // Электронный периодический научный журнал SCI-ARTICLE.RU [Сайт]. – URL: http://sci-article.ru/stat.php?i=1506601085 (дата обращения: 06.11.2017).

7. *Рубин, Л. Р.* Электроодонтодиагностика. – М. : Медицина, 1976. – 135 с.

8. *Николаев, А. И.* Электроодонтодиагностика / А. И. Николаев, Е. В. Петрова. – М. : МЕДпресс-информ, 2014. – 40 с.

9. *Кириллов*, *А. И.* Анализ метрологических характеристик электродиагностических аппаратов для диагностики твердых тканей зубов / А. И. Кириллов, Е. Ю. Шелковников, С. Р. Кизнерцев // Ползуновский альманах. – 2015. – № 1. – С. 111–114.

10. *Тимофеев, А. А.* Гальванические проявления в полости рта / А. А. Тимофеев, А. А. Тимофеев // Стоматолог-практик. – 2014. – № 2. – С. 64–67.

11. *Тихомиров, А. М.* Импеданс биологических тканей и его применение в медицине. – М. : Изд-во РГМУ, 2006. – 12 с.

12. *Леонтьев, В. К.* Детская терапевтическая стоматология / В. К. Леонтьев, Л. П. Кисельникова. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 896 с.
13. *Кузнецов, Б. В.* Справочное пособие заводского электрика / Б. В. Кузнецов, М. Ф. Сацукевич. – Минск : Беларусь, 1978. – 319 с.

E. Yu. Shelkovnikov, DSc in engineering, professor, head of laboratory
E-mail: evshelk@mail.ru
A. I. Kirillov, junior researcher
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia
M. P. Kozhevnikov, A. V. Matrosov, magister students
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Development of Information-Measuring System for Diagnostics of Hard Tooth Tissues

The article analyzes modern methods of diagnostics of carious lesions of hard tooth tissues. The choice of a promising electro-metric method for the creation of an information-measuring system allowing to perform diagnostics of hard tooth tissues in an automated mode is substantiated. The structural diagram of the developed system is given, the principles of its operation are considered.

Keywords: electrical conductivity, biological tissue, express-diagnostics, hard tooth tissues, caries

УДК 616-71

Р. И. Шигапов, студент
E-mail: ramilshigapov@mail.ru
А. С. Ворсина, магистрант
E-mail: vorsina2009@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Метод компьютерной пульсоксиметрии для диагностики синдрома обструктивного апноэ сна

В данной статье рассмотрен метод неинвазивного измерения показателей сатурации с помощью пульсоксиметра для диагностики заболеваний, связанных с работой дыхательных путей. Приводится информация о применении данного прибора и принципе его работы.

© Шигапов Р. И., Ворсина А. С., 2018

Ключевые слова: пульсоксиметр, фотоплетизмограмма, микроконтроллер, адсорбция света.

В настоящее время исследования показали, что 30 % всего взрослого населения храпит во сне. Храп является серьезной проблемой не только с точки зрения окружающего человека социума, но и может быть одним из ключевых симптомов синдрома обструктивного апноэ сна (СОАС).

Выявление болезни на ранней стадии позволяет провести наиболее эффективное лечение и не допустить критического состояния пациента. Для этого могут применяться различные методы диагностики: полисомнография, респираторный мониторинг, слипвидеоэндоскопия и компьютерная пульсоксиметрия.

Полисомнография является наиболее полным методом регистрации функций человеческого организма в период ночного сна. Такой способ подразумевает получение информации о дыхании, насыщении крови кислородом, зафиксировать дыхательные движения грудной клетки и брюшной стенки, положение тела пациента, снять электроэнцефалограмму, электромиограмму, электроокулограмму. Данное исследование проводится только в специализированных клиниках.

Респираторный мониторинг позволяет оценить дыхательные движения грудной клетки во сне.

Слипвидеоэндоскопия подразумевает осмотр носоглотки пациента во время медикаментозного сна при помощи эндоскопа.

Мониторинговая компьютерная пульсоксиметрия позволяет отслеживать сатурацию, частоту пульса и регистрировать звуковые особенности храпа с помощью цифрового микрофона. Полученные данные сохраняются в памяти прибора для дальнейшего анализа и обработки с помощью ПК.

Первый пульсоксиметр родился в результате трудов японского ученого Такуо Аояги – инженера корпорации NIHON KOHDEN. В 1972 г., погрузившись в изучение неинвазивных методов измерения сердечных выбросов, он сделал вывод, что оксигенацию (насыщение кислородом артериальной крови) можно рассчитать, учитывая колебания адсорбции (поглощения) света. Основываясь на этих выводах, в 1975 г. компания NIHON KOHDEN выпускает первый в мире пульсоксиметр.

Современные пульсоксиметры ушли далеко вперед в своем развитии, но основанная на использовании принципов фотоплетизмографии

методика пульсовой оксиметрии, заключающаяся в исследовании кровотока на определенном участке тканей с помощью источника излучения и фотопринимающего датчика, остается по-прежнему актуальной.

График фотоплетизмограммы представляет собой кривую, отображающую поглощение оптического излучения пульсирующей артериальной кровью. Рассмотрим рис. 1, отражающий некоторые информативные признаки фотоплетизмограммы. Участок АБ указывает время t_1, за которое произошло увеличение объема крови. Отрезок БГ – время t_2, за которое избыточное давление крови пришло в исходное состояние. Зубец В – это дикротический зубец, который может не проявляться на фотоплетизмограммах у некоторых групп пациентов. Чаще всего отсутствие этой впадины наблюдается у пожилых пациентов. Значением h характеризуется максимальное светопоглощение крови.

Стоит отметить, что существуют две разновидности пульсоксиметрии:

- трансмиссионная;
- отраженная.

Первая характеризуется тем, что она находится в прямой зависимости от эффекта пропускания света. То есть светодиод находится напротив фотодиода, который улавливает проходящий через ткани свет.

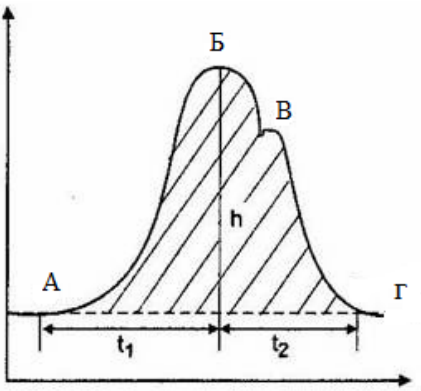


Рис. 1. Кривая фотоплетизмограммы

Вторая разновидность основывается на эффекте отражения света. В этом случае излучающий и принимающий датчики могут располагаться рядом.

Пульсоксиметр содержит аналоговую часть, которая представляет собой комбинацию из двух светоизлучающих диодов. Один из них формирует видимый спектр красного излучения, а второй – инфракрасного, а также фотодиода, который регистрирует интенсивность светового потока, отражающегося от крови и мягких тканей, в зависимости от концентрации кислорода в гемоглобине. Наиважнейшим элементом в построении пульсоксиметра является микроконтроллер, который выделяет компонент артериальной крови от постоянного компонента капиллярной или венозной крови. Также микроконтроллер приводит в действие светодиоды, измеряет полученный сигнал и передает результаты измерений на компьютер для их дальнейшей обработки. Цифровая часть такого устройства обеспечивает согласованные действия микроконтроллера, светодиодов и фотодиода, выводит информацию на дисплей в виде графика, который отображает сатурацию крови и частоту сердечных пульсаций.

Формула для подсчета сатурации выглядит следующим образом:

$$SpO_2 = \frac{Hb0_2}{HbO_2 + Hb} \times 100\% \quad (1)$$

где SpO_2 – сатурация крови, Hb– количество гемоглобина в крови, HbO_2 – количество оксигемоглобина в крови (гемоглобин, насыщенный четырьмя молекулами кислорода).

Структурная схема пульсоксиметра, включая в себя датчик, микропроцессор, детектор, формирователь управляющих сигналов, устройство тревожной сигнализации, дисплей и цифровой микрофон, показана на рис. 2.

Фотодиод преобразует интенсивность ослабленного «красного» и «инфракрасного» излучения в электрический сигнал, который поступает в усилительный тракт. Светодиоды в датчике включаются поочередно, поэтому для регистрации излучения можно использовать только один фотоприемник. В тракте усиления сигналы «инфракрасного» и «красного» излучения делятся на два канала с помощью формирователя управляющих сигналов, переключающих светодиоды. В каждом из каналов происходит измерение двух составляющих фотоплетизмограммы сигнала, которые обусловлены постоянной и пульсирующей составляющими поглощения света и необходимы для расчета отношения нормированных величин адсорбции света и определения сатурации. Так как излучение светодиодов уменьшается, проходя через тка-

ни человека, то их можно представить как неизбирательные фильтры, равномерно уменьшающие световой поток. Сила ослабления от препятствий на траектории движения света – наличие лака на ногтях, толщина тканей, наличие кожного пигмента.

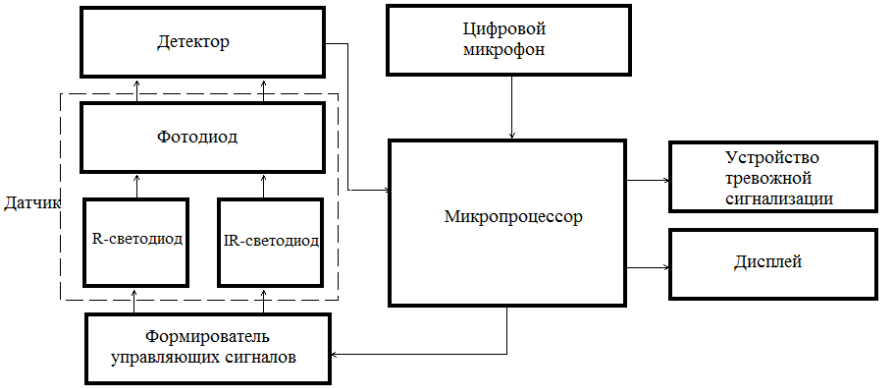


Рис. 2. Структурная схема пульсоксиметра

Микропроцессор пульсоксиметра реализует первичную обработку сигнала фотоплетизмограммы, а также алгоритмы выделения артериальных пульсаций по «красному» и «инфракрасному» каналам. Помимо этого происходит вычисление отношения нормированных величин адсорбции света и определение величины сатурации по занесенной в памяти процессора калибровочной зависимости.

Алгоритмы для обработки сигналов в пульсоксиметрах трудны, а сложность их объясняется большим уровнем помех при регистрации фотоплетизмограммы, а также требованиями быстродействия системы и высокой точности измерений. Полученные результаты измерений отображаются на дисплее пульсоксиметра в виде шкалы пульс-бар или кривой фотоплетизмограммы с соответствующими цифровыми значениями SpO_2. Цифровой микрофон необходим для регистрации звуковых особенностей СОАС, которые будут полезны при дальнейшей расшифровке полученных данных специалистом. Наличие тревожной сигнализации позволит контролировать возможное соскальзывание датчика, а также не даст пациенту подолгу находиться в критическом состоянии.

В ходе рассмотрения мониторинговой компьютерной пульсоксиметрии было выявлено, что данный метод позволяет регистрировать

звуковые особенности храпа с помощью цифрового микрофона и измеряет параметры, которые в большей степени относятся к данному заболеванию.

Важными достоинствами полученной конструкции данного прибора являются простота и доступность используемых элементов, быстродействие и точность, что немаловажно в современных цифровых устройствах.

Список литературы

1. *Агаханян, Т. М.* Электронные устройства в медицинских приборах : учеб. пособие / Т. М. Агаханян, В. Г. Никитаева. – М. : НИЯУ МИФИ, 2010. – 480с.

2. *Федотов, А. А.* Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга / А. А. Федотов, С. А. Акулов. – М. : Радио и связь, 2013. – 248 с.

3. Принципы и алгоритмы определения оксигенации крови по измерениям пульсоксиметра / В. Ф. Волков и др. // Медицинская техника. – 1993. – № 1. – С. 16–21.

4. Красный и инфракрасный излучатели с повышенным квантовым выходом для оксиметрии / Л. М. Коган и др. // Медицинская техника. – 1992. – № 5. – С. 21–25.

5. *Шурыгин, И. А.* Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия. – СПб. : Невский Диалект, 2000. – 301 с.

R. I. Shigapov, student
E-mail: ramilshigapov@mail.ru
A. S. Vorsina, magister student
E-mail: vorsina2009@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Method of Computer Pulse Oximetry for Diagnosis of the Syndrome Obstructive Sleep Apnea

In this article Remote method for non-invasive measurement of oxygen saturation using the oximeter for the diagnosis of diseases related to the work date ways. Ports information on the use of this device and principle of its work.

Keywords: pulse oximeter, photoplethysmogram, microcontroller, light absorption.

УДК 620.179.16, 620.19, 622.691.4

Д. О. Шишкин, техник
E-mail: d.shishkin@introscan.ru
С. Ю. Ворончихин, генеральный директор
ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи», г. Чайковский
А. А. Самокрутов, д-р техн. наук, генеральный директор
ООО «АКС», г. Москва

Оценка типа дефекта по угловому распределению амплитуды ультразвуковой волны, отраженной несплошностью, при контроле с применением внутритрубного сканера-дефектокопа A2072 IntroScan

В данной статье описаны способы оценки типов дефектов с применением технологии ультразвукового контроля сканером-дефектоскопом A2072 IntroScan, основанные на их отражающей способности.

Ключевые слова: ультразвук, неразрушающий контроль (НК), внутритрубный сканер-дефектоскоп, газотранспортная система (ГТС), внутритрубное техническое диагностирование (ВТД), магистральный газопровод (МГ), технологические трубопроводы (ТТ) компрессорной станции (КС), индикатриса рассеяния, пространственная огибающая, коэффициент формы, тип дефекта.

Введение

В настоящее время одной из важнейших задач нефтегазовой промышленности является обеспечение безопасной эксплуатации транспортной инфраструктуры отрасли. Самым экономически оправданным методом достижения этой цели остается систематический мониторинг трубопроводов, находящихся в эксплуатации, срок службы 80 % которых превышает 20-летний порог.

Постановка задачи

Газотранспортная система более чем на 60 % от общей протяженности состоит из линейных магистральных газопроводов, для обследования которых с начала 2000-х годов получили распространение магнитные снаряды-дефектоскопы, движущиеся в потоке транспортируемого продукта [1]. Около 30 % от общей протяженности ГТС занимают объекты, конструктивные особенности которых препятствуют

© Шишкин Д. О., Ворончихин С. Ю., Самокрутов А. А., 2018

проведению классического ВТД с применением снарядов-дефектоскопов. К указанным объектам относятся технологические трубопроводы КС, переходы трубопроводов через водные преграды, многочисленные переходы трубопроводов через ж/д и а/д, перемычки трубопроводов, трубопроводы узлов подключения МГ, газопроводы-отводы. В этой связи все более заметным фактором, влияющим на надежность Единой ГТС, является техническое состояние указанных объектов, а отсутствие эффективных средств контроля затрудняет возможность реализации на них мероприятий системы управления техническим состоянием и целостностью.

Особенностями диагностики основного металла ТТ можно назвать большую площадь обследования, наличие труднодоступных участков вследствие подземного исполнения и большого количество ответвлений, значительные загрязнения внутренней полости трубопроводов и отсутствие эффективных средств их очистки, короткие сроки вывода компрессорных цехов из эксплуатаци для диагностики и ремонта ТТ, наличие «опасных» трещиноподобных дефектов (КРН) и продольный характер их расположения.

Решение задачи

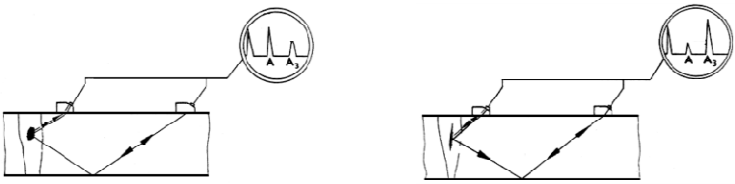
Учитывая особенности неразрушающего контроля ТТ КС, ЗАО «ИнтроСкан Технолоджи» был разработан инновационный внутритрубный сканер-дефектоскоп A2072 IntroScan, среди преимуществ которого автономность, высокий уровень автоматизации, возможность передвижения по любой образующей трубы за счет магнитных мотор-колес, слабая восприимчивость к состоянию внутренней поверхности трубопровода и высокая чувствительность благодаря уникальной акустической измерительной системе, что позволяет без нарушения целостности объекта и дополнительных очистных мероприятий провести обследование ТТ за короткий срок. Основу контрольно-измерительной системы сканера-дефектоскопа составляет акустическая антенная решетка, состоящая из датчиков с сухим точечным контактом, что позволяет проводить обследование деталей без дополнительной подготовки поверхности и применения контактной жидкости. Формирование зондирующих импульсов и фиксирование результирующих акустических сигналов осуществляется при передвижении сканера-дефектоскопа A2072 «IntroScan» по поверхности обследуемого элемента вдоль его оси с определенным шагом. При наличии аномалии на пути распространения волны возникают эхосигналы, которые регистрируются той же антенной решеткой, работающей в приемном режиме. За счет использования эффекта волноводного

распространения ультразвуковых волн в стенке трубы обеспечивается контроль всего тела трубы при перемещении сканера-дефектоскопа только по линии образующей, т. е. без необходимости сканирования всей внутренней поверхности трубопровода. Результат сканирования может быть представлен в виде сканограмм двух типов – «Гео А-скан» и «Гео SAFT». «Гео А-скан» является формой матричного отображения ультразвуковых сигналов, принимаемых антенной решеткой ультразвуковых датчиков при ее пошаговом перемещении вдоль выбранной траектории сканирования, представляемых на развернутой плоскости поверхности основного металла обследуемых деталей (труб), при этом в каждой локальной точке представления фиксируется амплитуда отраженного от аномалии эхосигнала. «Гео SAFT» представляет собой двумерное распределение аномальности основного металла деталей (труб), отображаемое в виде матричного представления развернутой на плоскости поверхности детали с фиксируемой в локальных точках количественной характеристики степени аномальности, рассчитанной по методу синтезированной фокусированной апертуры и когерентной обработки принятых эхосигналов, отражаемых от аномалии.

Сведения из теории

По своей форме дефекты можно условно подразделить на два типа: объемные – с округлыми краями и плоскостные – с острыми краями, выступающими концентраторами механических напряжений. В процессе эксплуатации наибольшую опасность представляют последние, поэтому определение типа дефектов является неотъемлемым условием при оценке остаточного ресурса диагностируемого трубопровода. Оценка типа дефекта может быть проведена на основании его отражающей способности или индикатрисе рассеяния. Индикатрисой рассеяния называют угловое распределение амплитуды отраженной несплошностью ультразвуковой волны, падающей на несплошность с определенного направления. Объемные дефекты отражают ультразвук относительно равномерно по всем направлениям (широкая индикатриса рассеяния), а плоскостные – направленно, т. е. преимущественно в каком-то одном направлении (узкая индикатриса рассеяния) [2].

При ультразвуковом контроле в ручном режиме коэффициент формы дефекта определяется как отношение амплитуды сигнала, отраженного от дефекта и дошедшего до преобразователя, к амплитуде сигнала, испытавшего двойное зеркальное отражение от дефекта и внутренней поверхности изделия при прозвучивании дефекта эхозеркальным методом (рис. 1) [3, 4].



а *б*

Рис. 1. Схема проведения контроля при прозвучивании:
а – объемного дефекта; *б* – плоскостного дефекта

Описание экспериментальных методов

Оценка типа дефекта при ультразвуковом контроле сканером-дефектоскопом А2072 «IntroScan» возможна двумя методами.

Первый метод – это оценка по пространственной огибающей акустических сигналов, отраженных от дефектного участка. Коэффициент формы $К_{ф1}$ определяется как отношение амплитуд эхосигналов, измереннных в краевой $А_к$ и центральной $А_ц$ областях огибающей, представленной на сканограмме в режиме «Гео А-скан» (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Участок сканограммы трубы в режиме «Гео А-скан»:
а – с объемным дефектом; *б* – плоскостным дефектом

Для объемного дефекта, типа сверление, коэффициент формы составил:

$$К_{ф1Об.} = \frac{А_к}{А_ц} = \frac{18дБ}{25дБ} = 0,72.$$

Для плоскостного, типа пропил:

$$К_{ф1Пл.} = \frac{А_к}{А_ц} = \frac{6дБ}{17дБ} = 0,35.$$

Таким образом, видно, что коэффициент формы стремится к 1 – для объемного дефекта и к 0 – для плоскостного.

Второй метод оценки типа дефекта представляет собой определение коэффицента формы как отношение амплитуды эхосигнала от дефекта при поперечном ($А_{попер}$) и продольном ($А_{прод}$) проходах сканера-дефектоскопа в «индикаторном» режиме измерения (рис. 3).

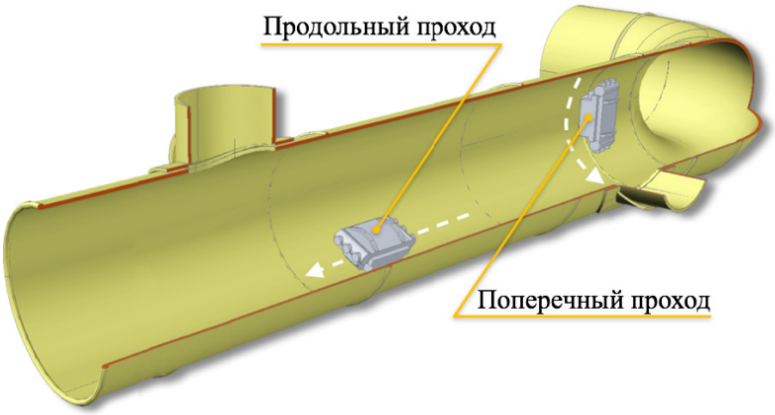


Рис. 3. Траектория движения сканера при продольном и поперечном проходах

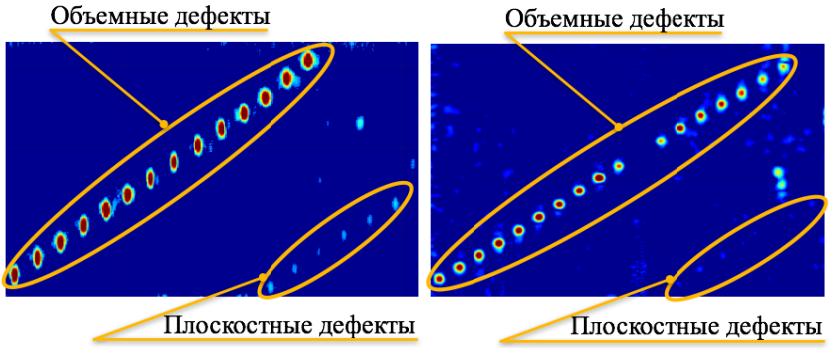
На полученных сканограммах в режиме «Гео SAFT» (рис. 4) средние значения амплитуды эхосигналов от искусственных объемных дефектов, типа сверление, при обоих проходах приблизительно равны: $А_{попер.Об.}$= 27 дБ, $А_{прод.Об.}$= 31 дБ, таким образом,

$$К_{ф\,Об.} = \frac{А_{попер.\,Об.}}{А_{прод.\,Об.}} = \frac{27\,дБ}{31\,дБ} = 0,87.$$

В то же время средние значения амплитуды эхосигналов от плоскостных дефектов, типа пропил, значительно разнятся: $А_{попер.Пл.}$= 7 дБ, $А_{прод.Пл.}$= 22 дБ, таким образом,

$$К_{ф\,Пл.} = \frac{А_{попер.Пл.}}{А_{прод.\,Пл.}} = \frac{7дБ}{22дБ} = 0,32,$$

т. е. прослеживается их пространственная ориентация вдоль оси трубы.



а *б*

Рис.4. Участок сканограммы трубы в режиме «Гео SAFT»:
а – при продольном проходе; *б* – при поперечном проходе

Выводы

Оба представленных метода оценки типа дефектов подтвердили свою достоверность при испытаниях на лабораторном стенде. Оценка допустимости применения первого метода была проведена в ходе опытно-промышленной эксплуатации на объектах ПАО «Газпром». Возможность оценки вторым методом в условиях промышленной эксплуатации связана с необходимостью модификации серийных образцов сканера.

Список литературы

1. *Ермолов, И. Е.* Эволюция средств и методов определения формы и размеров дефектов при ультразвуковом контроле / И. Е. Ермолов, А. Х. Вопилкин, В. Г. Бадалян // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 2. – С. 6–27.

2. *Гурвич, А. К.* Индикатрисы рассеяния как источник дополнительной информации о выявленных дефектах / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина // Дефектоскопия. – 1970. – № 6. – С. 47–56.

3. Способ определения типа дефекта в металлических изделиях : пат. 2524451 Рос. Федерация : G01N 29/00 / Немытова О. В., Ринкевич А. Б., Перов Д. В. ; опубл. 27.07.2014.

4. ГОСТ 14782–86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – Введ. 1988-01-01.

D. O. Shishkin, technician
E-mail: d.shishkin@introscan.ru
S. Yu. Voronchikhin, general director
IntroScan Technology, Ltd., Tchaikovsky, Russia
A. A. Samokrutov, DSc in engineering, general director
OOO "ACS", Moscow, Russia

Defect Type Evaluation at the Angular Distribution of Amplitude of Ultrasonic Waves Reflected by the Defect Using Scanner-Defectoscope A2072 IntroScan Testing

This article describes methods of defect type evaluation, using ultrasonic testing technology with scanner-defectoscope A2072 IntroScan, based on reflective properties of a particular defect types.

Keywords: ultrasound, coefficent of shape, type of defect, indicatrix scattering, in-line inspection, scanner-flaw detector.

УДК 662.998.494

А. Г. Элбакян, аспирант
E-mail: henry25@mail.ru
Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

Разработка и исследование процесса пироакустической обработки первичных холстов супертонкого базальтового волокна

Теплоизоляционные материалы на основе базальтового волокна получили широкое распространие в последние годы. Они температуростойкие, паропроницаемые, обладают химической стойкостью и в целом экологически чистые. Однако существенным недостатком, на который уделяется недостаточно внимания, является выделение мелкодисперсной пыли, вредной для человека, при производстве и использование базальтовых холстов. А также содержание травмоопасных неволокнистых включений в холстах из базальтового волокна по-прежнему остается высоким. Актуальна задача получения аналогичных материалов с меньшим содержанием неволокнистых включений и выделением мелкодисперсной пыли.

© Элбакян А. Г., 2018

Ключевые слова: базальтовое волокно, акустическое и термическое воздействие, экология, теплоизоляционный материал.

Введение

Увеличение объемов производства и практического использования в строительстве, машиностроении и теплоэнергетике теплоизоляционных изделий на основе супертонкого базальтового волокна требует решения вопросов безопасности и безвредности их для человека и окружающей среды. Выделение опасной для человека мелкодисперсной пыли при производстве и использовании теплоизоляционных материалов из базальтового волокна является проблемой, нуждающейся в безотлагательном решении. Кроме того, в изделиях содержится большое количество неволокнистых включений, которые могут быть причиной мелких травм, в целом снижают качество базальтового холста и также являются субъектами загрязнения. С целью улучшения качества изделий и современных материалов из базальтового волокна, а также уменьшения загрязнения окружающей среды и уменьшения вредности при производстве предлагается дополнительная обработка первичных холстов пироакустическим способом. Воздействие звукового поля позволяет удалять неволокнистые включения из базальтового волокна, а последующая обработка поверхности холстов высокотемпературным полем пламени позволит получить обеспыленные изделия на основе базальтового волокна. Экспериментальные данные позволят определить рациональные параметры этого процесса.

Стоит задача получить экспериментальные данные, подтверждающие и характеризующие процессы пирообработки и акустической обработки изделий из базальтового волокна. Определить рациональные параметры процесса пирообработки при его внедрении в производство.

Постановка задачи

В процессе производства базальтового волокна основными факторами вредного воздействия являются: шум, тепловое и световое излучения, выделение в воздух рабочей зоны аэрозолей замасливателя, пыли базальтового волокона, падающие капли горячего базальта, шум работающих машин, опасность от воздействия вращающихся и движущихся частей [1]. Для защиты от этих вредных факторов разработаны и внедрены все необходимые средства защиты. Однако вредные факторы, связанные непосредственно с холстами из базальтового волокна, остаются без должного внимания. Прежде всего, это мелкие травмы при контакте с холстами, содержащими большое количество

неволокнистых включений (корольков), и мелкодисперсная пыль, которая высвобождается из холстов и попадает в дыхательные системы человека даже при малейших трясках и перемещениях холстов.

Кор Й. М.Гейзен и Педро Х. Й.Кесселс предлагают способ и устройство для удаления королька из минерального волокнистого материала (http://www.findpatent.ru/patent/255/2554960.html). Однако такой способ является весьма трудоемким. В настоящем исследовании предлагается более рациональный и инновационный подход.

В. И. Шумский, В. И. Волков, М. А. Чайка, М. В. Дорошенко, М. Е. Цветков предлагают установку для термической обработки стеклоткани (http://www.findpatent.ru/patent/161/1616862.html). Целью изобретения является повышение производительности, расширение технологических возможностей и улучшение качества обрабатываемого материала. В настоящей статье предлагается пирообработка первичных холстов из базальтового волокна для спекания внешнего тонкого слоя холста и как следствие уменьшения выделения вредной мелкодисперсной пыли.

Эксперименты и результаты

Экспериментальные исследования воздействия акустического поля на первичные холсты из базальтового волокна дают положительные результаты и подтверждают возможность практического использования акустической обработки холстов из супертонкого базальтового волокна [2, 3]. Зависимость общей массы всех отделяющихся от холста под действием звукового поля неволокнитсых включений от частоты (рис. 1) определяет рациональные параметры процесса обработки при его внедрении в производство:

– эффективность акустической обработки будет наибольшей при частоте воздействующего звука 90 Гц;

– при конструировании оборудования для акустической обработки необходимо обеспечить возможность регулировки расстояния от источника звука до поверхности образца в пределах расстояния, которое обеспечит уровень звука в точке взаимодействия на уровне не ниже 118 дБ;

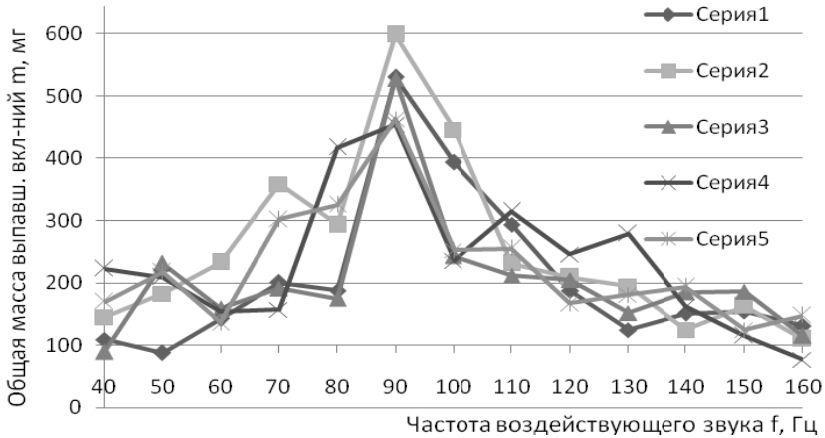


Рис. 1. Зависимость общей массы всех выпадающих под действием звукового поля неволокнистых включений от частоты звука

Также дают положительные результаты экспериментальные исследования пирообработки холстов из супертонкого базальтового волокна. Подтверждена возможность практического использования поверхностной обработки пламенем холстов из супертонкого базальтового волокна в целях уменьшения выделения из них пылевидных включений и улучшения условий труда работающих с ними людей (рис. 2). Определены рациональные параметры процесса пирообработки при его внедрении в производство:

– при конструировании оборудования для пирообработки необходимо обеспечить возможность регулировки расстояния от конфорки горелки до поверхности образца в пределах от 1 до 10 мм;

– скорость движения конвейера и количество горелок должны быть выбраны так, чтобы поверхность образца была подвержена воздействию пламени в области верхней границы температуры его плавления (1450 °С) в течение 20–40 с;

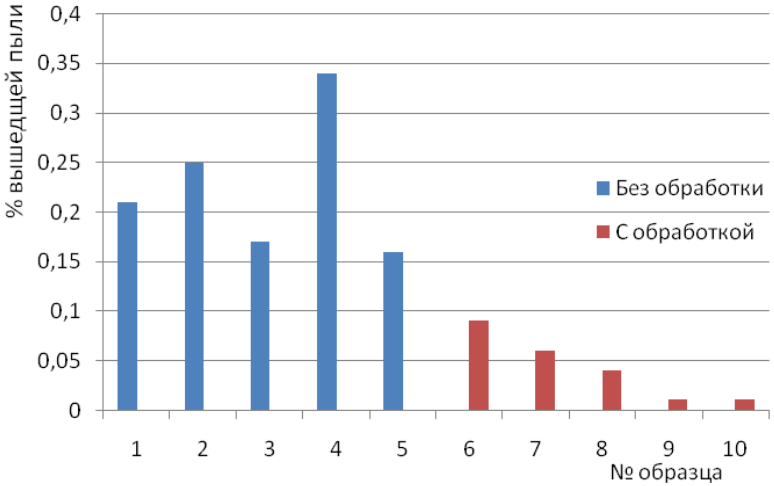


Рис. 2. Сравнительная гистограмма процентного содержания вышедшей пыли из необработанных холстов и холстов с пирообработкой в течение 10, 20, 30, 40 и 50 с (соответственно образцы № 6, 7, 8, 9, 10)

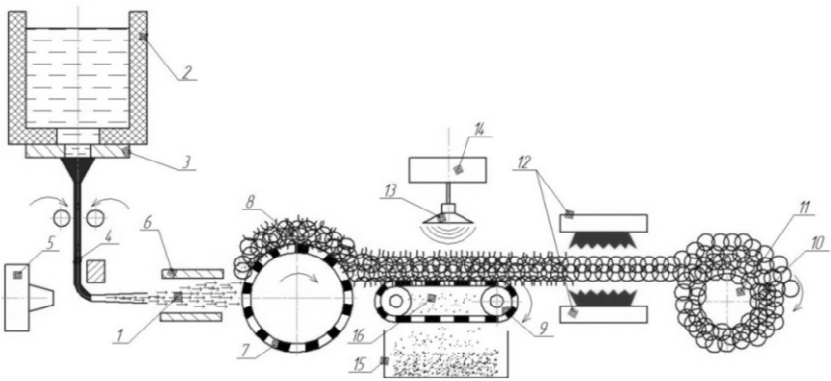


Рис. 3. Установка для производства базальтового волокна: *1* – элементарные базальтовые волокна, *2* – печь для плавления базальтовой крошки, *3* – фильерный питатель, *4* – первичная нить, *5* – сопловое устройство, *6* – транспортирующий диффузор, *7* – перфорированный барабан осаждения, *8* – элементарный холст, 9 – решетчатый транспортер, *10* – рулон, *11* – сматывающее устройство, *12* – нагревательные элементы, *13* – источник акустического поля, *14* – звуковой генератор, *15* – емкость для сбора, *16* – неволокнистые включения

На рис. 3 изображена установка для производства базальтового волокна, включающая пироакустическую обработку сформированных холстов. Данная установка позволит получать обеспыленные изделия из базальтового волокна с минимальным содержанием неволокнистых включений.

Список литературы

1. ГОСТ 53237–2008 [Электронный ресурс] // Все для строительства и ремонта [Сайт]. – URL: http:// http://vashdom.ru/gost/53237-2008/ (дата обращения: 20.11.2017).

2. *Элбакян, А. Г.* Экспериментальное исследование процесса акустической обработки холстов из супертонкого базальтового волокна / А. Г. Элбакян, Б. А. Сентяков // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. – 2017. – № 2. – С. 68–71.

3. *Сентяков, Б. А.*Технология производства теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна / Б. А. Сентяков, Л. В. Тимофеев // Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – 232 с.

A. G. Elbakian, postgraduate student
E-mail: henry25@mail.ru
Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Engineering and Research of the Thermo-Acoustic Processing of Elementary Canvases of Super-Thin Basalt Fiber

Thermal insulation materials based on basalt fiber have become widespread in recent years. They are temperature resistant, vapor permeable, have chemical resistance and, in general, are environmentally friendly. However, a significant disadvantage, which is not paid enough attention, is the allocation of fine dust, harmful to humans, in the production and use of basalt canvases. As well as the content of traumatic non-fibrous inclusions in basalt fiber canvas is still high. The problem of obtaining similar materials with a smaller content of non-fibrous inclusions and the release of fine dust is topical.

Keywords: basaltic fiber, acoustic and thermal impact, ecology, thermal insulation material.

УДК 620.179.16

А. В. Якимов, студент
E-mail: yakimov.aleksander@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Сравнение остаточных напряжений в рельсах, изготовленных по разным технологиям

В статье сравниваются остаточные напряжения в рельсах, изготовленных по технологиям объемной закалки и дифференцированного упрочнения. Для оценки напряжений используется прибор СЭМА на основе метода акустоупругости. Представлены результаты сравнения уровня остаточных напряжений и твердости в рельсах.

Ключевые слова: акустоупругость, электромагнитно-акустический преобразователь, остаточное напряжение, рельсы.

Введение

Наличие в рельсах остаточных напряжений сильно влияет на их эксплуатационные качества и механические свойства. Растягивающие напряжения могут сильно ухудшить срок службы изделия, приводя к развитию трещин и разрушению материала, а сжимающие напряжения способны повысить устойчивость деталей к внешним нагрузкам. Также они могут привести к выбросу рельсов в бесстыковом пути. Растягивающие и сжимающие напряжения, возникающие при высоких и низких температурах, способны снизить длительность работы рельсового пути [15–16].

Задача продления срока работы деталей и конструкций приводит к появлению новых методик выявления напряжений, возникающих при изготовлении элементов и в эксплуатации. Напряжения появляются в процессе производства (при термообработке) или прибавляются к начальным при механических нагрузках, сварке. В настоящее время актуальны исследования, в которых изучается возбуждение и прием ультразвуковых волн при условии сложной геометрической формы [1].

Целью работы является исследование твердости и остаточных напряжений в рельсах, изготовленных по разным технологиям.

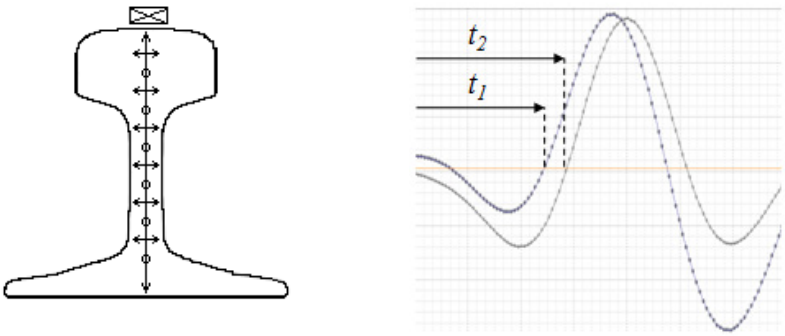
© Якимов А. В., 2018

Методика измерений

В основу технологии измерений напряжений в рельсах была положена известная методика контроля напряженно-деформированного состояния в железнодорожных колесах [2–5].

В основе метода лежит зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от механических напряжений в твердом теле, связанных через акустоупругие коэффициенты [6]. Для возбуждения ультразвуковых волн используется бесконтактный электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМА), входящий в разработанный на кафедре «Приборы и методы измерения, контроля и диагностики» ИжГТУ структуроскоп СЭМА [7].

Схема прозвучивания рельса представлена на рис. 1, *а*. ЭМА-преобразователь устанавливается на головку рельса, возбуждаются ортогонально поляризованные поперечные волны, которые отражаются от подошвы рельса и принимаются этим же ЭМА-преобразователем (ЭМАП). Принятые сигналы (рис. 1, *б*) обрабатываются в специализированном программном обеспечении Sensitive, в котором можно сравнивать импульсы двух принятых сигналов, измерять их амплитуду и разницу времен прихода.



а *б*

Рис. 1. Схема прозвучивания рельса (*а*), принятый сигнал (*б*)

Разница во времени прохождения импульсов, поляризованных вдоль и перпендикулярно оси рельса, пропорциональна значению остаточных напряжений. Значения времени распространения поперечных волн t_1 и t_2 по одному участку рельса используются для вычисления остаточных напряжений σ по формуле [8–14]:

$$\sigma = D\left(\frac{t_1}{t_2} - 1\right), \quad (1)$$

где D – коэффициент упруго-акустической связи для исследуемого материала, определенный экспериментально и равный –131 ГПа [7].

Результаты исследований

Для исследований были выбраны новые рельсы без наработки. Рельс № 1 изготовлен в 2013 г. способом объемной закалки. Рельсы 1О, 1И, Н1, Н2, Н3 изготовлены в 2017 г. способом дифференцированного упрочнения.

С помощью установки СЭМА осуществлялось возбуждение и прием ультразвуковых волн, используемой для контроля напряженно-деформированного состояния. Преобразователь устанавливался на головку и на шейку. Схема измерений представлена на Ри 2.

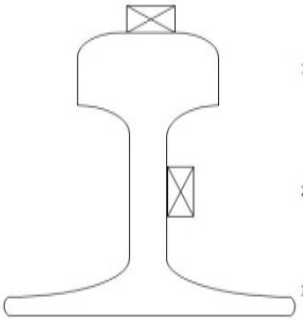


Рис. 2. Схема установки преобразователя поперечных волн

В каждой точке проводилось по 5 измерений для определения погрешности измерений и нахождения среднего значения.

Графики остаточных напряжений при измерениях на головке рельса представлены на рис. 3.

По графику можно определить, что рельс 2013 г. изготовления обладает сжимающими напряжениями от –40 МПа до –50 МПа. Рельс с маркировкой Н1 также обладает сжимающими напряжениями до –20 МПа, Н3 и Н6 до 35 МПа и 1И, 1О до 85 МПа растягивающими напряжениями.

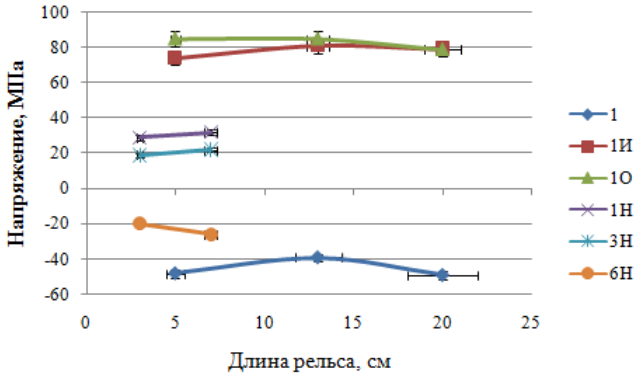


Рис. 3. График остаточных напряжений при измерениях на головке

Графики остаточных напряжений при измерениях на шейке рельса представлены на рис. 4.

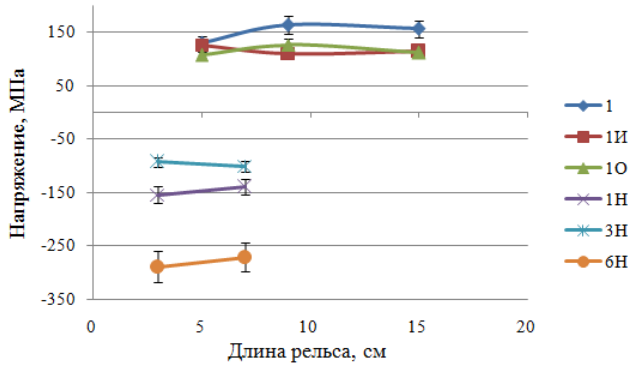


Рис. 4. График остаточных напряжений при измерениях на шейке

Для определения структуры поверхности катания измерили твердость на головке рельса. График твердости на головке показан на рис. 5.

Из графика видно, что поверхность катания дифференцированно-термоупрочненных рельсов обладает более твердой структурой.

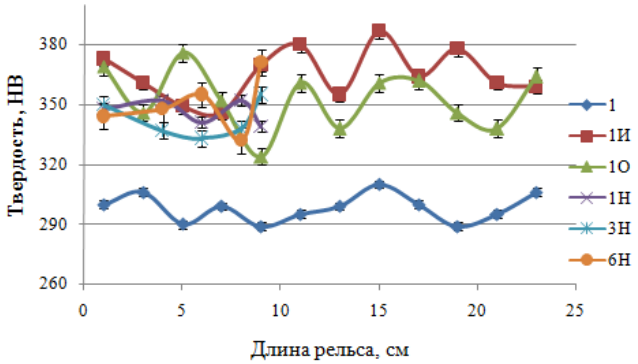


Рис. 5. График твердости при измерениях на головке

Выводы

По разнице прихода двух волн были рассчитаны остаточные напряжения в рельсах. При сравнении полученных результатов на головке рельсов (рис. 3) наименьшими остаточными напряжениями обладают образцы дифференцированно-термоупрочненных рельсов под маркировкой Н1, Н3 и Н6.

Также по измеренным результатам твердости можно утверждать, что головка дифференцированно-термоупрочненных рельсов более износостойкая, нежели объемно закаленных.

Список литературы

1. *Аркулис, Т. Э.*Теория пластичности / Т. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобец. – М. : Металлургия, 1987. – 352 с.

2. Измерение температуры рельсов в бесстыковом пути / В. А. Куликов, В. В. Муравьев, К. А. Никитин, Г. В. Брагин // Измерительная техника. – 2017. – № 5. – С. 53–55.

3. 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 имени М. Т. Калашникова, 2014. – 180 с.

4. *Муравьев, В. В.* Исследование акустоупругих характеристик тонких проволок / В. В. Муравьев, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – № 7. – С. 679–684.

5. *Муравьев, В. В.* Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупргости / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак,

А. В. Пряхин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 12. – С. 52–57.

6. *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. – С. 71–75.

7. 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.

8. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громова, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 12. – С. 34–37.

9. *Муравьев, В. В*. Прибор для исследований акустоупругих характеристик тонких проволок / В. В. Муравьев, Д. В. Злобин, А. В. Платунов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – № 6. – С. 572–577.

10. *Муравьев, В. В*. Распределение остаточных напряжений в железнодорожных колесах после электроконтактного упрочнения поверхности катания / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, Л. В. Волкова // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 64–74.

11. Связь глубины обезуглероженного слоя в рельсах со скоростью рэлеевских волн и коэрцитивной силой / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, С. В. Леньков, В. А. Захаров // Сталь. – 2017.– № 8. – С. 42–44.

12. *Муравьев, В. В*. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве / В. В.Муравьев, Л. В. Волкова, М. А. Лапченко // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 3–16.

13. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. – 2016. – № 7. – С. 12–20.

14. *Муравьев, В. В.* Экспериментальная оценка остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 4. – С. 98–104.

15. *Муравьев, В. В*. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, А. Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–68.

16. Реальная чувствительность входного акустического контроля прутков-заготовок при производстве пружин / О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, Е. Н. Кокорина, М. А. Лойферман // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 1 (59). – С. 52–60.

A. V. Yakimov, magister student
E-mail:yakimov.aleksander@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Comparison of Residual Stresses in the Rails Using Different Techniques

The article compares the residual stresses in rails produced by the technology of volume hardening and differentiated hardening. To estimate the stresses, a SEM device is used based on the acoustoelasticity method. The results of comparison of residual stress levels and hardness in rails are presented.

Keywords: acoustoelasticity, electromagnetic acoustic transducer, residual stress, rail.

УДК 620.179.14

В. В. Яковенко, д-р техн. наук, зав. кафедрой
С. Н. Швец, канд. техн. наук, докторант
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Луганский национальный университет имени Владимира Даля
Ю. В. Ливцов, преподаватель специальных дисциплин
Луганский колледж строительства, экономики и права

Прибор контроля качества виброупрочнения поверхностного слоя ферромагнитных деталей

Прибор предназначен для оперативного контроля толщины и твердости виброупрочненного слоя металла. В приборе последовательно используются магнитный и электромагнитный методы. Магнитный метод основан на локальном намагничивании контролируемой детали и измерении градиента магнитного поля феррозондом. При электромагнитном методе используется двухчастотное перемагничивание поверхности контролируемой детали. Два метода объединены в один путем линейной комбинации результатов измерения. Дается теоретическое обоснование используемых методов контроля. Приведена функциональная схема прибора и описание его действия.

Ключевые слова: упрочнение, виброобработка, микротвердость, феррозонд, катушка, вторая гармоника, коэрцитивная сила.

© Яковенко В. В., Швец С. Н., Ливцов Ю. В., 2018

Введение и постановка задачи

При виброупрочняющей обработке деталей главным показателем эффективности является качество упрочнения поверхности, которая определяет контактную жесткость и износостойкость обрабатываемых деталей. Задачей виброобработки при упрочнении поверхности детали является создание поверхностного слоя металла с повышенной микротвердостью достаточной толщины (до 0,5 мм) [1]. Имеется зависимость микротвердости и толщины упрочняемого слоя от продолжительности виброобработки. Превышение оптимального времени обработки (90–120 мин) приводит к снижению качества упрочнения поверхностного слоя металла. Поэтому обеспечить оптимальный временной режим обработки можно только при непрерывном контроле качества упрочняемого слоя, т. е. необходим контроль параметров поверхности обрабатываемых деталей непосредственно в процессе виброупрочнения. Для этой цели необходим метод и его приборная реализация определения твердости и толщины упрочняемого слоя во время технологического процесса виброупрочнения, который в настоящее время отсутствует.

Описание эксперимента и его результаты

Для создания метода и прибора контроля качества упрочнения верхнего слоя металла предварительно была получена информация о его магнитных параметрах. Для определения магнитных параметров поверхностного слоя стали были подготовлены образцы в виде пластин 200×40×1 мм^3 из стали 20 и 40Х, которые крепились в барабане и подвергались виброобработке различное время с интервалами 20 мин. После чего из пластин вырезались образцы размером 40×5×1 мм^3, которые стравливались до толщины 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 мм. Для стравливания металла применялось электрополирование. Металл стравливался с противоположной обработанной плоскости стороны. На специально разработанной [2] магнитометрической установке определялись функции намагниченности $M[H]$, коэрцитивная сила H_c, намагниченность насыщения M_S, остаточная намагниченность M_r, величина намагниченности, соответствующая точке на основной кривой намагниченности при $H = H_c$, $\chi_н$ – начальная магнитная восприимчивость.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что с увеличением времени обработки увеличивается толщина упрочняемого слоя, растет коэрцитивная сила, а после 64–90 мин убывает, уменьшается намагниченность насыщения.

Таблица 1. **Магнитные характеристики упрочненного слоя металла**

Время обработки, мин	Толщина слоя, мм	λ	M_s, А/м	H_c, А/м	M_r, А/м	H, А/м
	Сталь 20					
0	0,02	58	$1{,}49\cdot10^6$	440	$0{,}91\cdot10^6$	$0{,}54\cdot10^6$
24	0,03	52	$1{,}38\cdot10^6$	482	$0{,}9\cdot10^6$	$0{,}48\cdot10^6$
64	0,1	48	$1{,}25\cdot10^6$	518	$0{,}85\cdot10^6$	$0{,}42\cdot10^6$
96	0,21	47	$1{,}12\cdot10^6$	525	$0{,}8\cdot10^6$	$0{,}4\cdot10^6$
128	0,19	46	$1{,}02\cdot10^6$	474	$0{,}78\cdot10^6$	$0{,}4\cdot10^6$
	Сталь 40Х					
0	0,02	26	$1{,}48\cdot10^6$	1266	$0{,}78\cdot10^6$	$0{,}4\cdot10^6$
32	0,05	24	$1{,}32\cdot10^6$	1248	$0{,}69\cdot10^6$	$0{,}35\cdot10^6$
60	0,1	22	$1{,}28\cdot10^6$	1511	$0{,}6\cdot10^6$	$0{,}3\cdot10^6$
88	0,15	21	$1{,}21\cdot10^6$	1620	$0{,}59\cdot10^6$	$0{,}28\cdot10^6$
143	0,2	16	$1{,}18\cdot10^6$	1420	$0{,}54\cdot10^6$	$0{,}26\cdot10^6$

Производились измерения сопротивления образцов с помощью двойного моста, которое по мере обработки увеличивалось на 15–18 %.

Микротвердость измерялась прибором Викерса. Оценка толщины слоя производилась микрометром с точностью до 5 мкм. Экспериментально установлена связь между коэрцитивной силой и микротвердостью, которая в диапазоне измерения коэрцитивной силы при упрочнении носит практически линейный характер.

Для определения микротвердости и толщины поверхностного упрочненного слоя разработан прибор, блок-схема которого показана на рис. 1.

Катушка намагничивания имеет 420 витков провода диаметром 0,4 мм. Два полуэлемента феррозонда, включенные по схеме градиентометра, имеют сердечники длиной 16 мм, 200 витков обмотки возбуждения и 300 витков выходной обмотки. Имеются обмотки (350 витков) на обоих полуэлементах феррозонда, которые являются электромагнитным преобразователем.

Катушка намагничивания помещается на поверхность обрабатываемой детали, и в ее обмотку подается серия импульсов тока длительностью $2\cdot10^{-3}$ с, которые создают напряженность $2\cdot10^5$–$6\cdot10^5$ А/м. Магнитное поле катушки намагничивает локальную область металла. Включается измерительное устройство, с помощью которого измеря-

ется градиент напряженности поля рассеяния намагниченной локальной области металла.

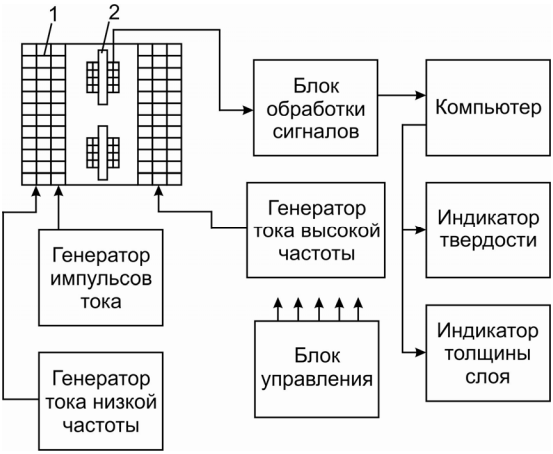


Рис. 1. Блок-схема прибора качества виброупрочненного слоя ферромагнитного изделия: *1* – катушка намагничивания; *2* – полуэлементы феррозонда

На втором этапе измерения в обмотку катушки подается ток низкой частоты 16 Гц амплитудой 4 А и ток высокой частоты 3,2 кГц амплитудой 0,05 А. Величина напряженности поля измеряется дополнительной обмоткой на сердечниках феррозонда. После обработки сигнал измерительного преобразователя подается на блок обработки сигналов. В этом блоке выделяется вторая гармоника высокочастотного напряжения, детектируется и переводится в цифровую форму, находится среднее значение напряжения второй гармоники за период низкочастотного тока, что является информационной величиной. Поскольку выходные сигналы градиентометра и двухчастотного прибора содержат информацию о толщине упрочненного слоя и микротвердости поверхностного слоя, то значение микротвердости и толщины упрочненного слоя находятся путем решения системы двух линейных уравнений [3]:

$$\begin{cases} U_r = a_1 H_\mu + a_2 \Delta z; \\ U_c = b_1 H_\mu + b_2 \Delta z, \end{cases} \quad (1)$$

где U_r – сигнал градиентометра; a_1, a_2, b_1, b_2 – коэффициенты, определяющиеся статистически, как коэффициенты уравнения регрессии для сигналов, измеренных на образцовых изделиях; U_c – сигнал электромагнитного датчика.

Решение системы уравнений (1) относительно неизвестных $H_\mu, \Delta z$, т. е. микротвердости и толщины упрочненного слоя, является результатом контроля качества поверхностного виброупрочняемого слоя металла разработанным прибором.

Для определения работоспособности прибора из стали 20 и 40Х были изготовлены образцы в виде пластин 200×40×1 мм^3, которые подвергались обработке 12, 26, 45 мин, после чего проходили контроль прибором и разрушающим методом путем стравливания скоса металла. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Результаты контроля качества виброупрочняемого слоя металла**

Материалы образцов	Неразрушающий контроль			Разрушающий контроль		
	12 мин	26 мин	45 мин	12 мин	26 мин	45 мин
Сталь 20, $H_\mu, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	150	162	230	149	158	212
	6 %	2,5 %	8 %			
40Х, $H_\mu, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	589	667	830	567	649	785
	4 %	3 %	6 %			
Сталь 20, Δz, мкм	60	125	240	61	120	215
	11 %	12 %	17 %			
40Х, Δz, мкм	34	84	168	30	75	155
	13 %	12 %	11 %			

Выводы

Погрешность измерений разработанным прибором не превышает при измерении микротвердости 8 %, при измерении толщины упрочняемого слоя – 13 %.

Список литературы

1. *Лубенская, Л. М.* Влияние вибрационной обработки на усталостную прочность металла / Л. М. Лубенская, С. Н. Ясуник, В. В. Кузнецов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2005. – Вип. № 7 .– С. 101–107.

2. *Букреев, В. В.* Магнитометрическая установка для определения магнитных параметров образцов тонкого слоя ферромагнитного материала / В. В. Букреев, А. П. Чурносов, С. Н. Швец // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25 – С. 17–22.

3. *Чурносов, А. П.* Магнитный метод неразрушающего контроля качества виброупрочняемого слоя металла : дис. … канд. техн. наук. – Луганск, 2012. – 160 с.

V. V. Yakovenko, DSc in engineering, professor
S. N. Shvets, CSc in engineering, associate professor, doctoral candidate
E-mail: dahl.pribory@yandex.ru
Vladimir Dahl Lugansk National University, LPR
U. V. Livcov, lecturer of special disciplines
Luhansk College of Construction, Economy and Law, LPR

Device of Vibrohardening Quality Control of Ferromagnetic Details Blanket

The device is intended for operating control of the vibrostrengthened metal layer thickness and hardness. In the device magnetic and electromagnetic methods are consistently used. The magnetic method is based on local magnetization of a controlled detail and measurement of magnetic field gradient by a ferroprobe. At an electromagnetic method two-frequency magnetic reversal of a controlled detail surface is used. Two methods are integrated in one way of a linear combination of measurement results. Theoretical justification of the used testing methods is given. The function chart of the device and the description of its action are provided.

Keywords: hardening, vibroprocessing, microhardness, ferroprobe, coil, second harmonica, coercitive force.

Секция 3. **Приборы в системах управления и контроля**

УДК 621.317

Е. Я. Ардашев, магистрант
E-mail: vaserman94@mail.ru
А. А. Штин, канд. техн. наук, доц.
E-mail: shtin_a_a@istu.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Разработка лабораторного стенда для исследования электронного счетчика электроэнергии

В статье приведен анализ современных электронных однофазных счетчиков электроэнергии по их основным параметрам, а также выбор одного из них для лабораторного стенда и блок-схема лабораторного стенда.

Ключевые слова: электронные счетчики, лабораторный стенд.

Введение

Долгое время для коммерческого учета активной электроэнергии использовались индукционные счетчики, имеющие ряд недостатков:

- низкий класс точности (2,5);
- необходимость частых периодических поверок;
- нет возможности дистанционной передачи информации.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 4.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии», индукционные счетчики подлежат замене на электронные с классом точности 2 (для квартир и домов) после истечения межповерочного интервала.

По данным компании Abercade, в 2012 г. в России было произведено 8250000 электросчетчиков, 90 % которых – однофазные. Так как

© Ардашев Е. Я., Штин А. А., 2018

большинство потребителей – однофазные, в докладе рассматриваются только однофазные счетчики. При этом все современные трехфазные счетчики поддерживают однофазный учет.

Цель:

1. Анализ современных однофазных счетчиков электроэнергии.
2. Выбор счетчика для разработки лабораторного стенда.

Задачи:

1. Разработка блок – схемы лабораторного стенда.
2. Организация передачи данных на персональный компьютер.
3. Сборка макета лабораторного стенда.

В связи с изложенным необходимо изучение устройства и возможностей электронных счетчиков в соответствующих электротехнических дисциплинах. Чтобы процесс обучения проходил наглядно, счетчик должен иметь жидкокристаллический экран для прямого снятия показаний тока, напряжения, коэффициента нагрузки. Также счетчик должен обладать интерфейсом для подключения к персональному компьютеру и, соответственно, иметь доступное программное обеспечение.

Сведения из теории

Основные производители электронных счетчиков в России

Счетчики электроэнергии в России производит около 30 предприятий, основными из которых являются:

1. АО Концерн Энергомера, г. Ставрополь. Основан в 1987 г. изначально как завод «Квант». На этом предприятии были разработаны первые электронные счетчики в СССР.
2. Холдинг «Инкотекс» (счетчики марки Меркурий), г. Москва. Основан в 1992 г. как производитель кассовых аппаратов. Ныне – многопрофильная компания, разрабатывающая и производящая высокотехнологичное электронное оборудование.
3. Холдинг «Московский завод электроизмерительных приборов» (МЗЭП). Основан в 1935 г. Производит радиоаппаратуру различного назначения, в том числе электросчетчики.
4. ООО «Вавиот», г. Москва. С 2010 г. разрабатывает и производит энергоэффективные телеметрические системы диспетчеризации.
5. АО «Каскад», г. Черкесск. Основано в 1966 г. как производитель штепсельных разъемов. Впоследствии освоило производство счетчиков электроэнергии.
6. АО «Ленэлектро», г. Санкт-Петербург. Основано в 2005 г., специализируется на счетчиках электроэнергии.

7. ООО «ТАЙПИТ – Измерительные Приборы», г. Санкт- Петербург. Основано в 1999 г. На сегодняшний день основная деятельность – производство различных приборов учета.

Для передачи данных при коммерческом учете потребляемой электроэнергии в современных электронных счетчиках применяются различные интерфейсы, рассмотренные далее.

Способы передачи информации об энергопотреблении

PLC (Power Line Communications) – телекоммуникационная технология передачи информации по силовой электросети на частоте 1–33 МГц. Этот интерфейс обеспечивает передачу данных только об учтенной электроэнергии. Максимальное количество подключенных устройств – несколько сотен. Максимальное расстояние – 800 м.

RS-485 – стандарт передачи информации по двухпроводному, полудуплексному, последовательному, симметричному каналу связи.

Сеть, основанная на интерфейсе RS-485, представляет собой приемопередатчики, соединенные при помощи витой пары. Интерфейс основан на принципе дифференциальной (балансной) передачи данных. Один сигнал за счет разности потенциалов передается по двум проводам: по первому идет оригинальный сигнал, а по второму – его инверсная копия. Такая передача обеспечивает устойчивость к синфазным помехам. Максимальное количество подключенных устройств – 32 (с повторителями до 256). Максимальное расстояние – 1200 м [http://m/ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/otlichiya-interfeysov-rs-232-rs-422-rs-485/#programmy].

RS-232 (COM-порт ПК) – стандарт передачи информации по дуплексному каналу связи между одним передатчиком и одним приемником. Для работы интерфейсу достаточно трех проводников: два для приема-передачи информации, один для заземления. В дополнение у RS-232 имеются специальные контакты для аппаратного управления потоками информации и другими функциями. Максимальное количество подключенных устройств – 1. Максимальное расстояние – 15 м. [http://m/ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/otlichiya-interfeysov-rs-232-rs-422-rs-485/#programmy]

Импульсный выход: импульсы передаются от счетчика по двум проводам пропорционально потребленной электроэнергии. Режим работы импульсного выхода отображается светодиодом.

Оптопорт – интерфейс передачи данных через инфракрасный канал связи. Максимальное количество подключений – 1.

GSM – интерфейс сотовой связи. Позволяет дистанционно считывать данные со счетчиков через сотовых операторов. Количество счетчиков не ограничено. Расстояние не ограничено [https://m/habrahabr.ru/post/268127].

CAN (Controller Area Network) – локальная сеть контроллеров. Устройства в CAN-системе соединяются в шину из двух сигнальных проводов (витая пара) и одного общего провода. Максимальное число абонентов зависит от вида приемо-передатчиков, например, с трансивером PHILIPS PCA82C250 можно подключить 110 абонентов. Максимальное расстояние – 1 км [http://bookasutp.ru/Chapter2 _6.aspx].

LPWAN (Low – Power Wide – Area Network). Компания Вавиот разработала собственную радиосеть. От GSM отличается тем, что у компании свои серверы, базовые станции, модемы и свой протокол радиосвязи в широком диапазоне частот. Максимальное число точек учета – 2000000. Максимальное расстояние – 10 км [http://waviot.ru/o-kompanii].

В табл. 1 приведены ориентировочные цены счетчиков разных производителей. Сравнение цен приведено для таких параметров, как PLC и реле управления нагрузкой, потому что стоимость счетчика значительно зависит от наличия этих функций.

Таблица 1. **Стоимость счетчиков электроэнергии различных производителей**

Стоимость, руб.	Энерго-мера	МЗЭП	Инкотекс	Вавиот	Каскад	Лен-электро	Тайпит
1 тариф	600–900	600–1200	600–650	–	700	560	550–700
4 тарифа и более	1300–2500	1100–1350	1300–2600	2800–3400	1600	2100	1100–2000
PLC-модем	3000–3500	–	2300–4000	–	–	–	2600–4000
Реле управления нагрузкой	4000	1420–2200	2200–5800	2800–3400	1600	2100	2600–4000

Поскольку лабораторный стенд рассчитан только на один счетчик электроэнергии, в интерфейсах LPWAN, CAN, GSM и PLC нет необходимости, тем более их использование требует ежемесячной абонентской платы.

От каждого производителя было выбрано по одному многотарифному счетчику в ценовой категории до 3000 рублей, согласно финансовым возможностям. Сравнение некоторых их параметров приведено в табл. 2.

Таблица 2. **Выбор счетчика**

Параметры	CE102M S7145AV	СОЭ-5/50 (60)-Т-125	Меркурий 206 PRNO	Фобос 1	Каскад-1-МТ	ЛЕ221.1.R 2.DO	Нева МТ114AS
Количество тарифов	4	4	4	4	4	4	4
Доступное ПО	Admin Tools	RS-RULL	Меркурий-Энерго-учет	Нет доступа	Meter Tools	Нет доступа	Neva Read
Интерфейс	RS-485/ Оптопорт	RS-485	RS-485/ Оптопорт	LPWAN	RS-485/ Опто-порт	RS-232	RS-485/ Опто-порт
Реле управления нагрузкой	–	–	+	+	+	–	+
Стоимость, руб	1900	1350	2680	2800	1600	2100	2600
Наличие в Ижевске	+	–	Под заказ	–	–	–	–

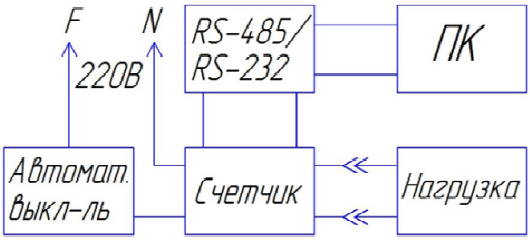
Из табл. 2 видно, что многотарифные счетчики отличаются между собой доступностью программного обеспечения, различными вариациями интерфейса передачи данных, наличием реле управления нагрузкой, стоимостью и возможностью приобретения в городе Ижевске. Наиболее важными параметрами при выборе счетчика являются интерфейс и наличие в городе, поэтому можно сделать вывод, что для поставленных целей целесообразно использовать счетчик Энергомера CE102M S7 145AV либо счетчик Инкотекс Меркурий-206 PRNO.

Приобретен счетчик Энергомера.

Разработка блок-схемы лабораторного стенда

На основе анализа однофазных электронных счетчиков электроэнергии выбран счетчик Энергомера CE102M S7 145AV. Он снабжен интерфейсом RS-485 для конфигурации параметров энергосбытовыми компаниями и для считывания показаний.

Структурная схема лабораторного стенда приведена на рисунке.



Структурная схема лабораторного стенда

Лабораторный стенд представляет собой панель, на которой располагается счетчик электроэнергии, соединяющийся навесным монтажом со штепсельной розеткой для подключения к счетчику какой-либо нагрузки и с автоматическим выключателем для защиты счетчика, нагрузки и лаборанта в случае короткого замыкания или перегрузки. Счетчик подключается к бытовой электросети 220 В через провод со штепсельной вилкой, в этой цепи между вилкой и счетчиком на фазовом проводе устанавливается автоматический выключатель.

Для снятия показаний счетчик подключается к персональному компьютеру через преобразователь интерфейса RS-485/RS-232. RS-232 подключается к COM-порту компьютера. Для считывания показаний на персональном компьютере должно быть установлено программное обеспечение самого счетчика (Admin Tools 3.9) и драйвер COM-порта для работы преобразователя интерфейса.

Макет лабораторного стенда

Все элементы макета лабораторного стенда размещаются на стальном перфорированном листе:

- счетчик электроэнергии;
- автоматический выключатель;
- штепсельная розетка.

Для соединения элементов цепи использовался многожильный провод марки ПВ-2 сечением 1,5 . Подключение к сети 220 В осуществлялось проводом ПР-2х1,5 длиной 1 м со штепсельной вилкой. Для подключения к ПК использовалась витая пара.

Для снятия показаний со счетчика на персональном компьютере с операционной системой Windows XP установлен драйвер для работы преобразователя интерфейса RS-485/USB и программа «AdminTools 3.9», находящаяся в свободном доступе на сайте www.energomera.ru.

Заключение

Проведен анализ электронных счетчиков наиболее известных производителей. Для создания лабораторного стенда выбран электронный счетчик Энергомера CE102M S7 145AV. Разработан и собран макет схемы лабораторного стенда для исследования данного счетчика. Проведены испытательные работы, в результате которых установлено, что счетчик CE102M S7 145AV полностью работоспособен и позволяет считывать параметры электрической нагрузки как напрямую, так и через интерфейс дистанционной связи. Установлено, что с помощью общедоступного программного обеспечения со счетчика можно считывать следующие параметры:

- потребленная энергия,
- мощность,
- напряжение,
- ток,
- частота,
- коэффициент нагрузки (cos φ),
- дата/время,
- параметры тарифов,
- сумма за потребленную энергию.

Также определено отсутствие возможности корректировать данные параметры без специального доступа, который предоставляется энергосбытовым организациям, обслуживающим счетчик.

Список литературы

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии : Постановление правительства РФ от 4.05.2012 № 442 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130498 [Сайт] (дата обращения: 10.10.2017).

2. Руководство по эксплуатации САНТ.411152.035 РЭ. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.energomera.ru/ru/products/meters/ce102ms7 [Сайт] (дата обращения: 17.10.2017).

3. ГОСТ Р МЭК 61107–2001. Обмен данными при считывании показаний счетчиков, тарификации и управления нагрузкой [Электронный ресурс]. – URL: http://docs.cntd.ru/document/1200029479 (дата обращения: 17.10.2017)

4. *Гуртовцев, А. Л.* Электронные электросчетчики для АСКУЭ / А. Л. Гуртовцев, В. В. Бордаев, В. И. Чижонок // Электро. – 2005. – № 6. – С. 32–41.

E. Ya. Ardashev, magister student
E-mail: vaserman94@mail.ru
A. A. Shtin, CSc in engineering, associate professor
E-mail: shtin_a_a@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Development of a Laboratory Stand for the Study of the Electronic Electricity Meter

In this article presents an analysis of modern electronic single-phase electricity meters according to their main parameters, as well as the choice of one of them for the labolatory stand and the block-diagram of the laboratory stand.

Keywords: overview, electricity meters.

УДК 621.31(045)

В. В. Горохова, магистрант
E-mail: varvaragorohova@mail.ru
А. Е. Фокеев, канд. техн. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Определение дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник в элементах электрических сетей с учетом фактического вклада потребителей в несинусоидальность тока и напряжения

Приведены алгоритмы определения дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник тока и напряжения в элементах электрической сети с учетом фактического вклада потребителей в несинусоидальность тока и напряжения.

Ключевые слова: потери активной мощности, гармоники тока, гармоники напряжения, электрические сети.

В настоящее время все более актуальной становится проблема обеспечения качества электрической энергии и соблюдения условий электромагнитной совместимости. Высшие гармоники тока приводят к по-

© Горохова В. В., Фокеев А. Е., 2018

явлению в электрической сети высших гармоник напряжения, что приводит к ухудшению соответствующих показателей качества электрической энергии по ГОСТ 32144–2013 [1]. Среди номенклатуры показателей качества электрической энергии, регламентируемых ГОСТ, – параметры, характеризующие изменение только напряжения. Ограничение эмиссии высших гармонических составляющих тока в Российской Федерации регламентируется соответствующими стандартами лишь для электроприемников (технических средств) с целью их сертификации на соответствие нормам электромагнитной совместимости. Уровень эмиссии высших гармонических составляющих тока в электрическую сеть потребителем (определение потребителя в соответствии с [2]) в Российской Федерации не регламентируется.

Высшие гармоники тока и напряжения создают дополнительные потери активной мощности и электрической энергии в элементах электрической сети. Снижение потерь электрической энергии имеет особую важность в отрасли электроэнергетики и в энергоемкой промышленности. Ввиду этого задачи определения и минимизации потерь активной мощности от высших гармоник тока и напряжения в элементах электрической сети являются актуальными.

Методы расчета дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник в элементах электрической сети (трансформаторах, кабельных и воздушных линиях, реакторах, конденсаторных батареях) известны, приведены во многих источниках и даже реализованы в программных комплексах [3]. Однако сам расчет позволяет лишь оценить величину дополнительных потерь, не определяя при этом возможность отнесения затрат, связанных с дополнительными потерями, на потребителя – источника высших гармоник. Существует метод определения фактического вклада потребителя (объекта) в уровень несинусоидальности в точке общего присоединения (далее ТОП), приведенный в [4].

Рассмотрим возможные алгоритмы определения дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник в типовой электрической сети (рис. 1) для соответствующих приборов учета электрической энергии, а также с учетом фактического вклада потребителя в уровень несинусоидальности тока и напряжения.

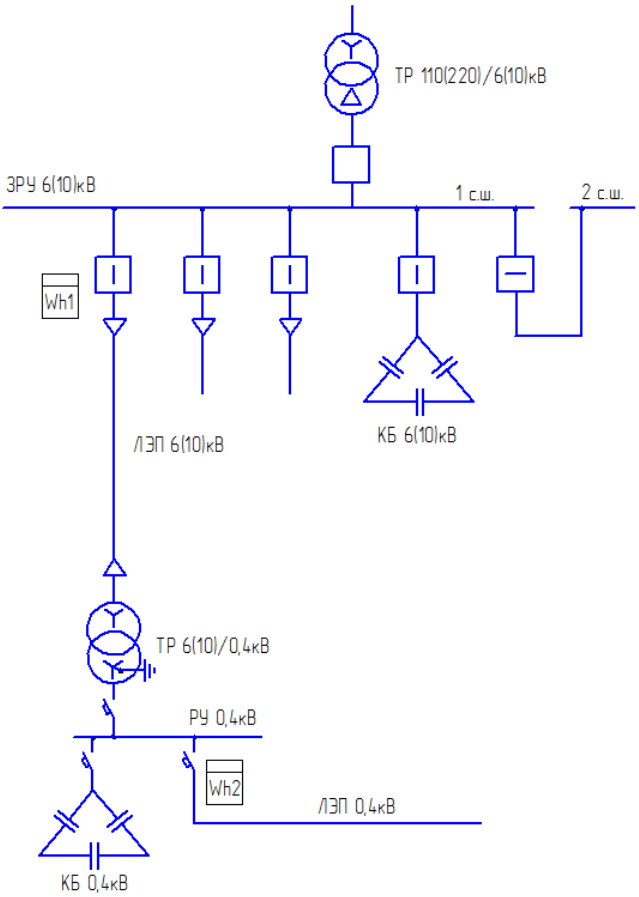


Рис. 1. Типовая схема электрической сети

Расчет потерь в линии электропередач (ЛЭП) основан на использовании выражения

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = 3r_0 l \sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 \left(k_{\Pi\nu} + k_{\delta\nu}\right), \qquad (1)$$

где r_0 – удельное сопротивление проводника постоянному току; I_ν – ток ν-й гармоники; l – длина линии электропередач; $k_{\Pi\nu}$ – коэффициент, учитывающий явление поверхностного эффекта для ν-й гармоники; $k_{\delta\nu}$ – коэффициент, учитывающий эффект близости для ν-й гармоники [5].

Расчет потерь в силовом трансформаторе (ТР) базируется на использовании формулы

$$\Delta P_{\Sigma\nu} = 3\sum_{\nu=2}^{n} I_\nu^2 R_{к1} k_{\nu m} + \Delta P_{х.х.} \sum_{\nu=2}^{n} \left(\frac{U_\nu}{U_{ном.}}\right)^2 + 0,607 \frac{\Delta P_{к.з.}}{u_{к.з.}^2} \sum_{\nu=2}^{n} \frac{1+0,05\nu^2}{\nu\sqrt{\nu}} \left(\frac{U_\nu}{U_{ном.}}\right)^2, \quad (2)$$

где I_ν – ток ν-й гармоники, проходящей через трансформатор; U_ν – напряжение ν-й гармоники на зажимах первичной обмотки трансформатора; $U_{ном.}$ – номинальное напряжение; $\Delta P_{к.з}$ – потери короткого замыкания; $\Delta P_{х.х}$ – потери холостого хода; R_{k1} – сопротивление короткого замыкания трансформатора на основной частоте; $k_{\nu m}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости [6].

Расчет потерь в конденсаторных батареях (КБ) [7] основан на использовании выражения

$$\Delta P_{\Sigma диэл} = \omega C_{ном} \operatorname{tg}\delta_{ном} \left(\sum_{\nu=2}^{20} U_\nu^2 \nu + 1,5 \sum_{\nu=21}^{40} U_\nu^2 \nu\right), \quad (3)$$

где U_ν – напряжение ν-й гармоники; $C_{ном}$ – электрическая емкость конденсаторной установки; ν – номер гармоники; ω – угловая частота; $\operatorname{tg}\delta_\nu$ – тангенс угла потерь диэлектрика на ν-й гармонике.

Для приборов учета электрической энергии Wh1 и Wh2 (счетчики электрической энергии) расчет дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник напряжения и тока, с учетом фактического вклада потребителя в уровень несинусоидальности тока и напряжения, можно реализовать по следующему алгоритму:

– при программировании счетчика вводятся значения r_0, l, $k_{П\nu}$ и $k_{\delta\nu}$;

– счетчиком измеряются значения высших гармоник напряжения U_ν;

– счетчиком измеряются значения высших гармоник тока $I\nu$;

– счетчиком измеряются углы $\varphi UI(\nu)$ фазового сдвига для каждой гармонической составляющей тока $I\nu$ и напряжения $U\nu$;

– по выражению (1) рассчитываются добавочные потери активной мощности высших от гармонических составляющих тока $I\nu$ в линии электропередачи, для которых на рассматриваемом интервале усреднения $-90° > \varphi_{UI(\nu)} > 90°$;

– по выражению (2) рассчитываются дополнительные потери активной мощности высших от гармонических составляющих тока *Iv* в силовом трансформаторе, для которых на рассматриваемом интервале усреднения $-90° > \varphi_{UI(v)} > 90°$;

– по выражению (3) рассчитываются дополнительные потери активной мощности высших от гармонических составляющих тока *Iv* в конденсаторных батареях (фильтр-компенсирующем устройстве), для которых на рассматриваемом интервале усреднения $-90° > \varphi_{UI(v)} > 90°$.

Реализация рассмотренных выше алгоритмов расчета дополнительных потерь в приборах учета электрической энергии позволит выполнять уже не оценку, а расчет дополнительных потерь для принятых расчетных интервалов измерения электрической энергии с учетом фактического вклада потребителя в несинусоидальность тока и напряжения. При условии корректировки соответствующих нормативных документов затраты, связанные с дополнительными потерями от высших гармоник тока и напряжения, могут быть перераспределены на потребителей – источников высших гармоник.

Список литературы

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Электронный ресурс]. – URL : http://docs.cntd.ru/document/1200104301 (дата обращения: 17.10.2017).

2. Об электроэнергетике : федер. закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 29.12.2017) : [принят Гос. Думой 21 февр. 2003 г. : одобр. Советом Федерации 12 марта 2003 г.]. – URL : – http://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-26032003-n-35-fz-ob/ (дата обращения: 17.10.2017).

3. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник тока и напряжения в элементах систем электроснабжения / А. Г. Лютаревич, А. А. Вырва, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов, И. Н. Четверик. – Омский научный вестник. – № 1 (77). – 2009. – С. 109–113.

4. РД 153-34.0-15.502–2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии [Электронный ресурс]. – URL : http://docs.cntd.ru/document/1200032472 (дата обращения: 17.10.2017).

5. *Семичевский П. И.* Методика расчета дополнительных потерь активной мощности и электрической энергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленных высшими гармониками : дис. … канд. техн. наук. – М., 1978. – 206 с.

6. *Васютинский С. Б.* Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.

7. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев. – М. : Энергия, 1975. – 248 с.

V. V. Gorokhova, magister student
E-mail: varvaragorohova@mail.ru
A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Determination of Additional Losses of Active Power from Higher Harmonics in the Elements of Electrical Networks, Taking into Account the Actual Contribution of Consumers to the Non-Sinusoidal Current and Voltage

The algorithms for determining additional losses of active power from the higher harmonics of current and voltage in the elements of the electric network are given, taking into account the actual contribution of consumers to the non-sinusoidal current and voltage.

Keywords: loss of active power, current harmonics, voltage harmonics, electrical networks

УДК 621.385

А. Л. Джауль, магистрант
E-mail: foulter@yandex.ru
И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц.
E-mail: igorst58@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Алгоритм расчета температуры стальной детали в процессе вакуумного хромирования при фазовых превращениях в стали

Разработан алгоритм программы расчета температуры стальной полой детали в процессе вакуумного хромирования, учитывающий влияние эндотермической реакции фазовых превращений, протекающих в материале детали.

© Джауль А. Л., Штенников И. В., 2018

Ключевые слова: вакуумное хромирование, полая деталь, тепловое состояние, фазовые превращения, эндотермические реакции, алгоритм расчета.

Введение

Вакуумное хромирование полых деталей методом термического испарения с соосно расположенного испарителя [1, 2] сопровождается значительным нагревом детали в процессе формирования покрытия [3]. Схема нанесения покрытия приведена на рис. 1.

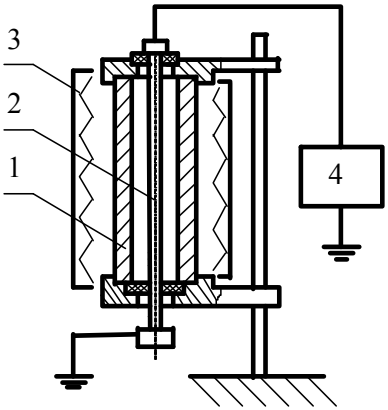


Рис. 1. Схема нанесения покрытия на полые детали:
1 – деталь; *2* – испаритель; *3* – нагреватель; *4* – источник тока

Перед нанесением покрытия деталь *1* предварительно подогревается с помощью нагревателя *3*. Затем, путем пропускания электрического тока от источника тока *4*, испаритель *2* разогревают до температуры, при которой происходит испарение материала покрытия. Образующийся поток пара, конденсируясь на внутренней поверхности детали *1*, образует защитное покрытие.

Тепловое излучение сильноразогретого (1650-1800 К) [4], близкорасположенного к поверхности детали (2-12 мм) испарителя и выделяющаяся теплота конденсации способствуют разогреву детали [5].

На основе анализа тепловых процессов [5, 6], имеющих место при формировании покрытия, в работе [7] разработана математическая модель теплового состояния полой детали при нанесении металлического покрытия на ее внутреннюю поверхность методом термического испарения в вакууме с соосно расположенного стержневого резистивного испарителя, составлен алгоритм и программа расчета изменения

температуры детали в зависимости от режимов и условий нанесения покрытия.

Отклонение результатов теоретических расчетов от экспериментальных исследований температуры покрываемой детали, приведенных на рис. 2, не превышает 5 %. Исследования температуры проводились в процессе вакуумного хромирования втулок из стали марки 50РА [7].

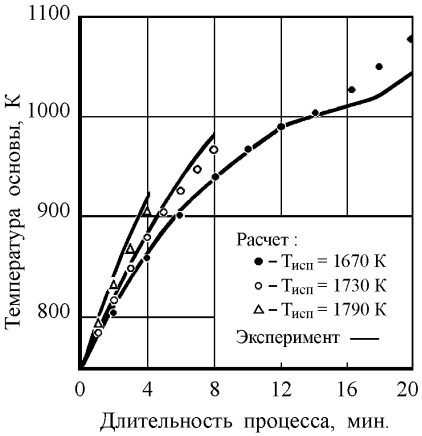


Рис. 2. Температура детали в процессе осаждения хромового покрытия ($T_{конд.0}$=750 К)

При анализе экспериментальных исследований (рис. 2) на кривой, соответствующей температуре испарителя 1670 К, при достижении температуры 1000 К наблюдается участок замедления нагрева детали. Причиной, обуславливающей это замедление, является поглощение тепла эндотермической реакцией превращения ферритно-цементитной смеси в аустенит, протекающей в материале детали при достижении температуры фазового перехода [8].

Целью данной работы является повышение точности расчета температурного состояния стальной детали путем учета влияния эндотермических реакций фазового превращения, протекающих в стали.

Влияние фазовых превращений

В работе [8] установлено, что эндотермические реакции начинают протекать сразу после превышения температуры A_1 (1000 К). Величина участка замедления (рис. 3, *а*) характеризует темп распространения в сечении изделия температуры, термодинамически разрешающей превращение перлита в аустенит. В общем случае характер замедления в разные

промежутки времени прохождения реакции неодинаков. Наибольший вклад оказывает второй этап, когда превращения происходят с максимальной скоростью и потребляют наибольшую тепловую мощность.

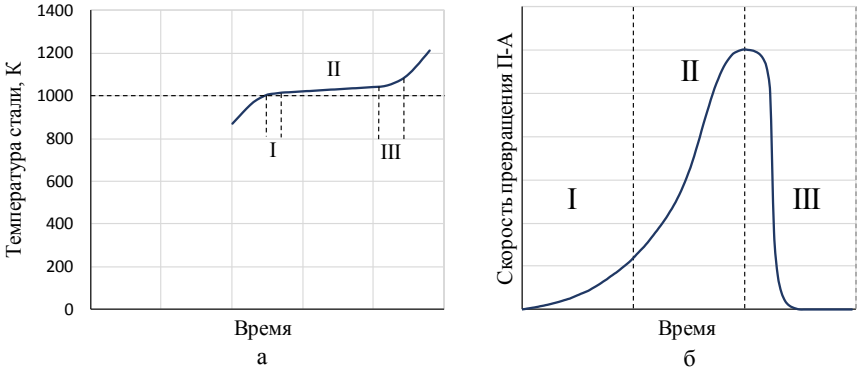


Рис. 3. Периодизация превращения перлита в аустенит: I – первый этап – накопление новой фазы; II – второй этап – период максимального развития процесса; III – третий этап – резкое замедление скорости превращения: (*а* – участок кривой нагрева вблизи температуры A_1, *б* – изменение скорости превращения с температурой)

При одинаковом химическом составе стали, одинаковой форме и степени дисперсности карбидных включений величина участка замедления может в значительной степени различаться в зависимости от сечения нагреваемого изделия. Скорость же превращения единичного объема перлита в аустенит остается одинаковой независимо от сечения или места превращения. Введение понятия тепловой мощности фазовых превращений позволяет оценить влияние эндотермических реакций на тепловое состояние детали.

Под тепловой мощностью превращения понимают количество тепловой энергии, поглощаемой 1 г вещества в секунду [8]:

$$P_{\text{п}} = \frac{g_{\text{п}}}{\tau}, \qquad (1)$$

где $g_{\text{п}}$ – тепловой эффект фазовых превращений; τ – время превращения ферритного промежутка в аустенит.

Принимая, что тепловой эффект не уменьшается с повышением температуры и на превращение 1 г перлита затрачивается максимальное количество тепла, а также что все превращение совершается только при максимальной температуре периода фазовых превращений,

тепловая мощность перлитно-аустенитного превращения может быть определена по формуле (1) для любой скорости нагрева. Например, для среднеуглеродистой доэвтектоидной стали (0,4 % С) тепловой эффект составит 49,35 Дж/г (11,75 кал/г).

Тепловое состояние детали в процессе вакуумного хромирования с учетом фазовых превращений описывается уравнением [6, 7]:

$$q(t) = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}} - q_{\text{дет.нар}} - q_{\text{фаз}}, \tag{2}$$

где $q_{\text{изл}}$ – плотность теплового потока излучения испарителя; $q_{\text{конд}}$ – плотность теплового потока конденсации материала; $q_{\text{дет.нар}}$ – теплообмен между наружной поверхностью детали и внутренними устройствами вакуумной камеры; $q_{\text{фаз}}$ – плотность теплового потока эндотермической реакций фазовых превращений в материале детали.

Изменения температуры покрываемой детали описываются уравнением теплопроводности Фурье при нестационарном режиме:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}\left(ar \frac{\partial T}{\partial r} \right), \tag{3}$$

при начальных и граничных условиях:

$$t = 0, T\left(r, 0\right) = T_{\text{конд.0.}} = \text{const.}$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_o} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}} - q_{\text{фаз}} = q_1; \tag{4}$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q_{\text{дет.нар}} + q_{\text{фаз}} = q_2, \tag{5}$$

где a и λ – соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала детали; $T_{\text{конд.0.}}$ – начальная температура конденсации; r_o и R – соответственно радиусы внутренней и наружной поверхностей полой детали.

Алгоритм расчета температуры детали

В соответствии с вышеизложенным математическим описанием составлен алгоритм расчета изменения температуры полой стальной детали в процессе вакуумного хромирования, в основе которого лежит метод конечных разностей при использовании метода прогонки [9]. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

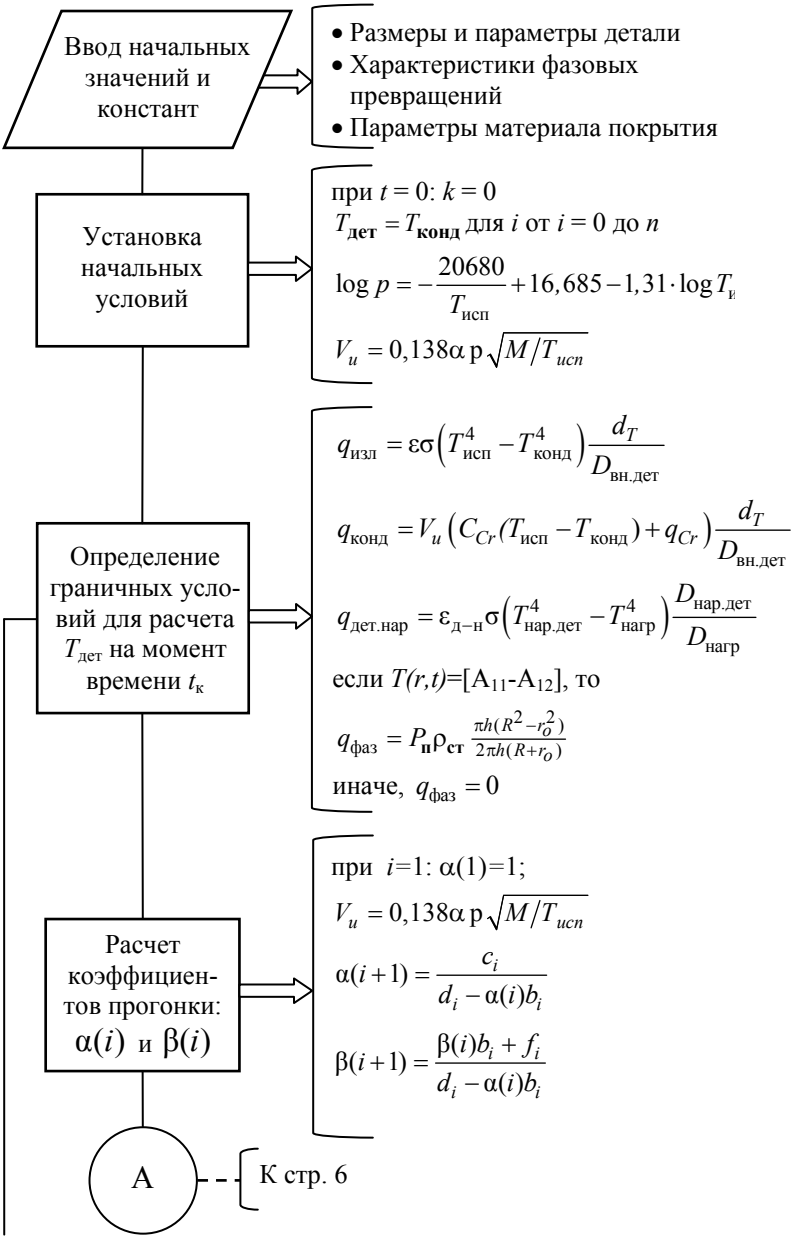


Рис. 4. Алгоритм расчета температуры стальной детали в процессе вакуумного хромирования при фазовых превращениях в стали (*начало*)

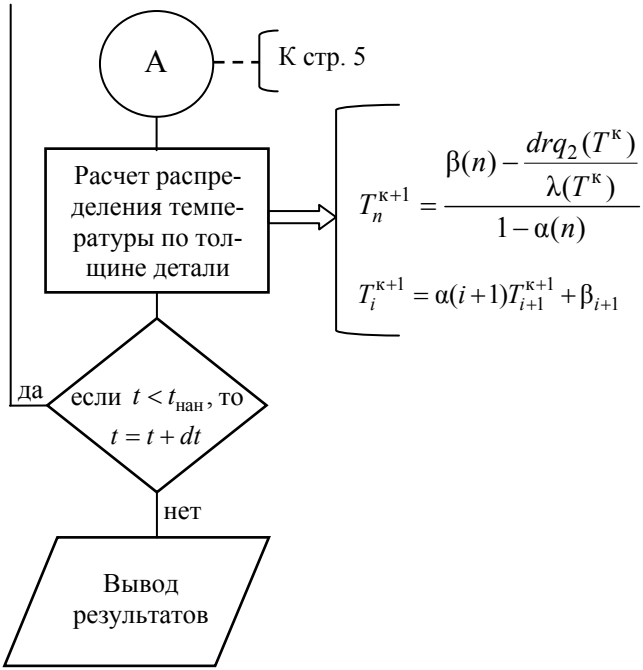


Рис. 4. Алгоритм расчета температуры стальной детали в процессе вакуумного хромирования при фазовых превращениях в стали (*окончание*)

После установки начальных значений и режимов нанесения покрытия производится расчет граничных условий для решения краевой задачи распределения температуры по толщине детали, где учитывается влияние эндотермических реакций на температуру детали: плотность теплового потока фазовых превращений определяется исходя из значения тепловой мощности. Поскольку эндотермические реакции превращения протекают по всей толщине сечения, а не только на границах, учитывается количество теплоты, поглощенное всем объемом детали. Таким образом, плотность теплового потока фазовых превращений рассчитывается по формуле:

$$q_{фаз} = P_{п}\rho_{ст}\frac{V_{дет}}{S_{дет}} \qquad (6)$$

где $\rho_{ст}$ – плотность стали; $V_{дет}$ – объем покрываемой детали; $S_{дет}$ – полная площадь детали.

Влияние энергии эндотермических реакций на температуру детали учитывается в температурном промежутке, определенном интервалом температур фазовых превращений (A_{11}–A_{12}). Данный интервал сильно варьируется и зависит от скорости нагрева детали [8]. По завершении расчета граничных условий вычисляются коэффициенты прогонки для расчета распределения температуры по толщине детали. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто время нанесения покрытия.

Выводы

Разработанный алгоритм расчета температуры полой стальной детали в процессе вакуумной металлизации ее внутренней поверхности учитывает влияние эндотермических реакций, протекающих в стали, на температуру детали, что позволяет повысить точность моделирования тепловых процессов при температурах фазовых превращений в процессе нанесения покрытия методом термического испарения в вакууме.

Список литературы

1. *Ушаков, В. В*. Повышение эффективности процесса хромирования стальных изделий / В. В. Ушаков, В. И. Сидоренко, О. И. Шаврин // Автоматизация и механизация трудоемких процессов : тез. науч. докл. – Устинов: Удмуртия, 1984. – С. 37–38.

2. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность труб : заявка № 58–42267 Япония, МКИ С23С 13/02. 19.09.83.

3. *Сидоренко, В. И*. О влиянии теплового излучения испарителя при конденсационном хромировании внутренней поверхности труб / В. И. Сидоренко, О. И Шаврин, И. В. Штенников // Современные достижения в области металловедения и термообработки : сб. науч. ст. – Пермь, 1985. – С. 117–124.

4. *Сидоренко, В. И.* Конусообразные кристаллиты в структуре хромовых покрытий / В. И. Сидоренко, И. В. Штенников // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд. дом «Удмуртский университет», 2001. – С. 48–52.

5. *Сидоренко, В. И.* Феноменологические признаки конденсационного метода упрочнения и защиты малых отверстий деталей // XXXI научно техническая конференция ИжГТУ, 15–17 апр. 1998 г. : тез. докл. – В 2 ч. – Ч. II. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 1998. – С. 191–195.

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

7. *Сидоренко, В. И.* Математическая модель теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей / В. И. Сидоренко,

И. В. Штенников // Интеллектуальные системы в производстве : рецензир. науч.-теорет. журн. – 2017. – № 2. – С. 71–76. – DOI: 10.22213/2410-9304-2017-2-71-75.

8. *Кидин, И. Н.* Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. – М. : Металлургия, 1969. – 375 с.

9. *Самарский, А. А.* Численные методы : учеб. пособие для вузов / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.

A. L. Jaule, magister student
E-mail: foulter@yandex.ru
I. V. Shtennikov, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Calculation Algorithm of Temperature of a Steel Bushing in the Vacuum Chrome Plating process in the course of Phase Changes in Steel

An algorithm is developed for calculating a temperature of a steel hollow bar in the vacuum chrome plating process, which takes into account the effect of the endothermic reaction in the course of phase changes in the material of the bushing.

Keywords: vacuum chrome plating, hollow bar, thermal state, phase changes, endothermic reactions, calculation algorithm.

УДК 681.326.7

Р. И. Зямилов, магистрант
В. А. Стародубцева, канд. техн. наук, доц.
E-mail: nash96@bk.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ возможности использования микроконтроллеров AVR для управления «умным домом»

Рассмотрены вопросы применения микроконтроллеров AVR для систем домашней автоматизации «умный дом» с целью уменьшения затрат на электроэнергию и повышения комфорта в доме. Проанализированы готовые системы для «умного дома» и выявлены их положительные и отрицательные стороны. Предложено использование доступных микроконтроллеров с последующим их применением для «умного дома». Описаны примеры подклю-

© Зямилов Р. И., Стародубцева В. А., 2018

чения к рассмотренным микроконтроллерам. На основании проведенного анализа автором предлагается создание системы «умный дом» на микроконтроллере AVR, дается схема возможного подключения.

Ключевые слова: микроконтроллер, AVR, «умный дом», SPI, UART, Atmel.

Введение

С помощью микроконтроллеров можно решить различные технические задачи, в том числе в электрооборудовании. Например, управление освещением лестничных клеток и придомовых территорий; дистанционное управление микроклиматом в жилых домах, зимних садах и домашних теплицах, дистанционное открытие и закрытие въездных и гаражных ворот и многое другое.

Описание возможности микроконтроллера

Преимуществом микроконтроллеров AVR является их простота в использовании, связанная с изменением параметров. Их использование позволяет уменьшать количество коммутационной аппаратуры и организовать удаленный доступ управлением и мониторингом всех систем автоматизации.

Микроконтроллеры AVR могут быть использованы для дистанционного контроля и управления большинством инженерных систем, входящих в понятие «умный дом».

На рис. 1 (http://www.dom-electro.ru/что-такое-умный-дом/) приведены различные функции, которые нужно выполнять при создании «умного дома».

При использовании микроконтроллера можно выполнять (как на месте, так и дистанционно) контроль различных параметров. Например, с помощью метеорологического датчика, сумрачного датчика, датчиков для регулировки жалюзи, управления системой вентиляции и изменения температуры в помещении в целом, входящих в систему автоматизации климата, создаются комфортные условия для пребывания людей; с помощью видеонаблюдения, датчиков движения, датчиков протечки воды и ее аварийного отключения, датчика утечки газа, объединенных в охранную систему, можно избежать аварийных случаев и несчастных случаев; с помощью изменения яркости и сценарного освещения можно создать приятную атмосферу и комфортные условия для работы и отдыха.

Сейчас на рынке присутствует немало компаний, предлагающих свои услуги в сфере проектирования и монтажа «умных домов».

У готовых систем есть ряд преимуществ: отработанная технология, надежность; готовые модули, с помощью которых можно решать основные задачи. Но также имеются и недостатки: высокая цена – пожалуй, самый главный недостаток; как правило, не очень большая гибкость управляющего модуля; ограниченные возможности управляющего модуля; закрытость технологии и/или протоколов и/или схемотехники; отсутствие или недостаточные возможности для сопряжения с другими системами дома.

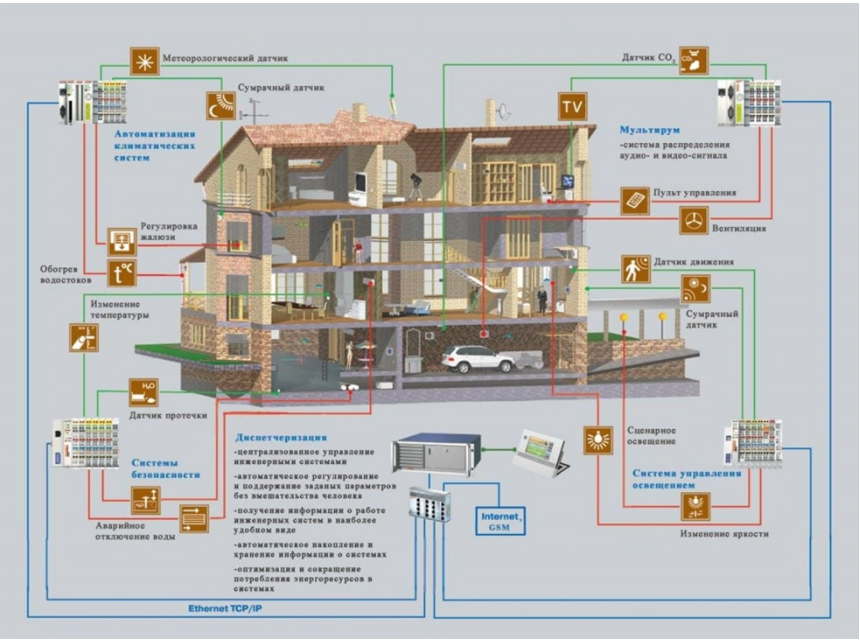


Рис. 1. Функции, выполняемые микроконтроллером в «умном доме»

Постановка задачи и методы решения

Целью настоящей работы является создание таких систем управления, которые по функционалу не уступают готовым системам, но имеют меньшую стоимость и простоту обслуживания.

Для создания такой системы управления «умным домом» рекомендуется использование микроконтроллера AVR с определенным количеством датчиков и других периферийных устройств, подключаемых

непосредственно к ножкам микроконтроллера, а также с использованием SPI- и UART-интерфейсов.

Использование SPI-интерфейсов предполагает наличие одного ведущего устройства – master, в роли которого выступает микроконтроллер AVR, и множества ведомых устройств – датчиков slave. [1]

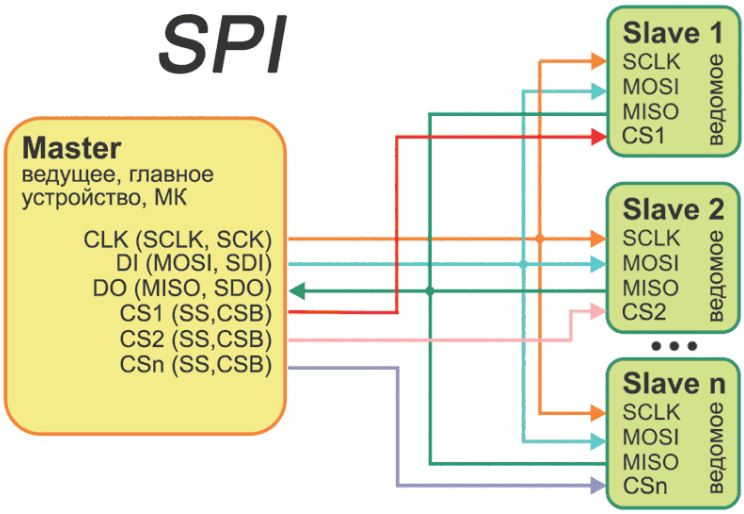


Рис. 2. Структура подключения устройств по SPI-интерфейсу

Рассмотрим серию 8-разрядных высокопроизводительных RICS-микроконтроллеров общего назначения производства Atmel Corp., объединенных общей маркой AVR.

AVR, пожалуй, одно из самых интересных направлений, развиваемых корпорацией Atmel. Они представляют собой мощный инструмент для создания современных высокопроизводительных и экономичных многоцелевых контроллеров. На настоящий момент соотношение «цена – производительность – энергопотребление» для AVR является одним из лучших на мировом рынке 8-разрядных микроконтроллеров.

Микроконтроллеры AVR содержат два подсемейства: tiny и mega. Микроконтроллеры tiny имеют объем FLASH-ПЗУ 1–2 кбайт и корпус 8–20 выводов, а вот ряд mega имеет FLASH-ПЗУ 1–128 кбайт и корпус 28–64 вывода [2].

В лабораторных условиях были проведены испытания лабораторного стенда, в которых с помощью микроконтроллера AVR Atmega 8 производилось управление нагрузкой посредством bluetooth-связи. На рис. 3 представлена схема подключения реле к микроконтроллеру.

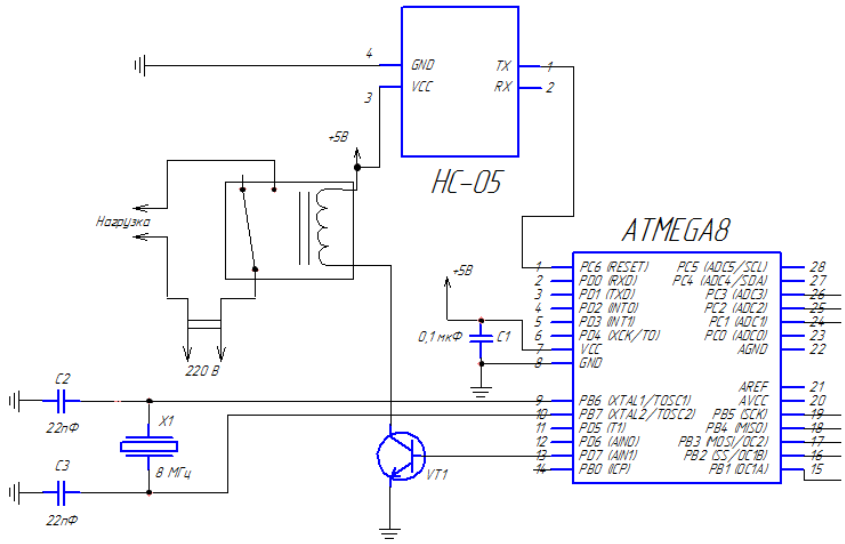


Рис. 3. Схема подключения реле к микроконтроллеру AVR

Благодаря большему количеству выводов (от 28 до 64) рекомендуется использовать микроконтроллеры AVR семейства mega. Данное преимущество позволяет использовать микроконтроллер AVR с последующим расширением функций.

Выводы

Применение микроконтроллеров AVR для систем «умный дом» позволяет организовать удаленный доступ и мониторинг всеми системами автоматизации, обеспечить простое обслуживание, сэкономить средства, дополнять существующие функции и реализовать новые.

Список литературы

1. *Лапин, А. А.* Интерфейсы. Выбор и реализация. – М. : Техносфера, 2005. – 168 с.

2. *Алексеев, К. Б.* Микроконтроллерное управление электроприводом : учеб. пособие / К. Б. Алексеев, К. А. Палагута. – М. : МГИУ, 2008. – 298 с.

3. *Головин, Д.* «Умный» дом: жизнь в ногу со временем [Электронный ресурс] // Zoom CNews Россия [Сайт]. – URL: http://zoom.cnews.ru/publication/item/18660/ (дата обращения: 28.10.2017).

R. I. Zyamilov, magister student
V. A. Starodubceva, CSc in engineering, associate professor
E-mail: nash96@bk.ru, starodubceva_v_a@istu.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Analysis of the Possibility of Using AVR Microcontrollers to Manage Smart Home

The questions of application of AVR microcontrollers for home automation systems "Smart House" are considered, in order to reduce the cost of electricity and increase the comfort in the house.

Keywords: microcontroller, AVR, Smart Home, SPI, UART, Atmel.

УДК 621.382

И. А. Капшунов, магистрант
П. Н. Иванов, студент
А. А. Штин, канд. техн. наук, доц.
E-mail: dev1-1188@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Стенд для изучения переключаемых диодов

Предложена схема управляемого выпрямителя на тиристорах. Приведено описание работы разработанного лабораторного стенда для выбранной схемы управления переключаемыми диодами.

Ключевые слова: управляемый выпрямитель, тиристор, лабораторный стенд.

В процессе выпрямления переменного тока часто требуется не только преобразовывать переменное напряжение в постоянное, но и

© Капшунов И. А., Иванов П. Н., Штин А. А., 2018

плавно изменять значение выпрямленного напряжения. Управлять выпрямленным напряжением можно как в цепи переменного напряжения, так и в цепи выпрямленного тока.

При управлении в цепи переменного напряжения применяют специальные регулируемые трансформаторы, реостаты или потенциометры. При таком способе управления выпрямленным напряжением они имеют существенный недостаток, связанный с низким к.п.д. Также такие регуляторы имеют высокую стоимость, большую массу и габариты [1].

Более широкое распространение получил способ управления выпрямленным напряжением в процессе выпрямления, так называемое управляемое выпрямление. Такой способ управления является более экономичным.

Выпрямители, которые совмещают управление выпрямленным напряжением с выпрямлением переменного напряжения, называют управляемыми выпрямителями. С развитием силовой электроники появляется все большая потребность в универсальных силовых выпрямителях, и особенно в управляемых.

Управляемый выпрямитель на тиристорах позволяет получать большие токи в нагрузке при незначительной мощности, затрачиваемой в цепи управления тиристора.

Способ регулирования напряжения на нагрузке основан на управлении во времени моментом отпирания вентилей выпрямителя за интервал проводимости. Он основывается на использовании в схеме выпрямителя управляемых вентилей – тиристоров, поэтому такой выпрямитель называют управляемым.

Оптимальной формой управляющих сигналов для тиристоров является короткий импульс с крутым фронтом. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени служат специальные импульсно-фазовые системы управления. Изменять угол управления можно ручным или автоматическим способом, что обеспечивает изменение выпрямленного напряжения в требуемых пределах.

На кафедре «Электротехника» изучаются такие дисциплины, как «Электроника» и «Силовая электроника». Поэтому для изучения тиристорного выпрямителя желательно иметь соответствующий лабораторный стенд.

Существует множество различных видов тиристоров, например, динистор, симистор, запираемый тиристор, программируемый тиристор, тетродный тиристор, пороговый тиристор, тиристор с обратной проводимостью, фототиристор и др. [2].

При создании лабораторного стенда за основу была взята обобщенная структурная схема управляемого выпрямителя, изображенная на рис. 1.

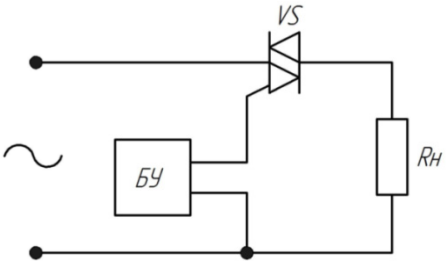


Рис. 1. Обобщенная структурная схема управляемого выпрямителя: У – блок управления; VS – симистор; Rн – нагрузка На рис. 2 показана подробная структурная схема, учитывающая источник питания, нагрузку и устройство блока управления

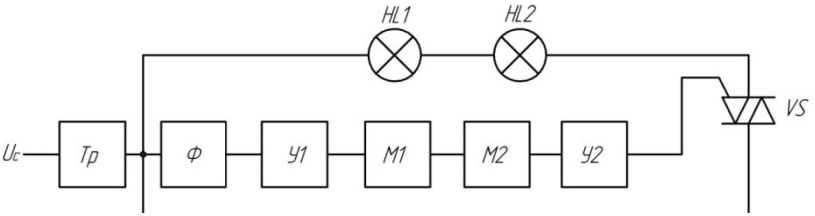


Рис. 2. Структурная схема управляемого выпрямителя: Тр – трансформатор; Ф – формирователь; У1,У2 – усилители; М1,М2 – мультивибраторы; VS – симистор; HL1,HL2 – лампы накаливания

Напряжение сети 220 В понижается трансформатором Тр до безопасной величины. Это необходимо для того, чтобы исключить поражение человека электрическим током.

К вторичной обмотке трансформатора подключен формирователь Ф, который преобразует синусоидальное напряжение в прямоугольные импульсы. Усилитель У1 необходим для запуска ждущего мультивибратора ЖМ1, который позволяет менять длительность выходного импульса. Второй ждущий мультивибратор вырабатывает импульс строго постоянной длительности, равной половине периода сети, т. е. 10 мс.

К выходу второго мультивибратора подключен второй усилитель У2, который формирует короткий импульс и обеспечивает необходимый выходной ток. Выходной сигнал У2 поступает на управляющий электрод симистора VS, который в нужный момент открывает его, тем самым изменяя ток и напряжение в нагрузке. В качестве нагрузки ис-

пользуются две лампы накаливания: HL1 и HL2. Таким образом, изменяя длительность импульса ЖМ1, мы фактически меняем угол управления симистора.

На рис. 3 представлена принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя.

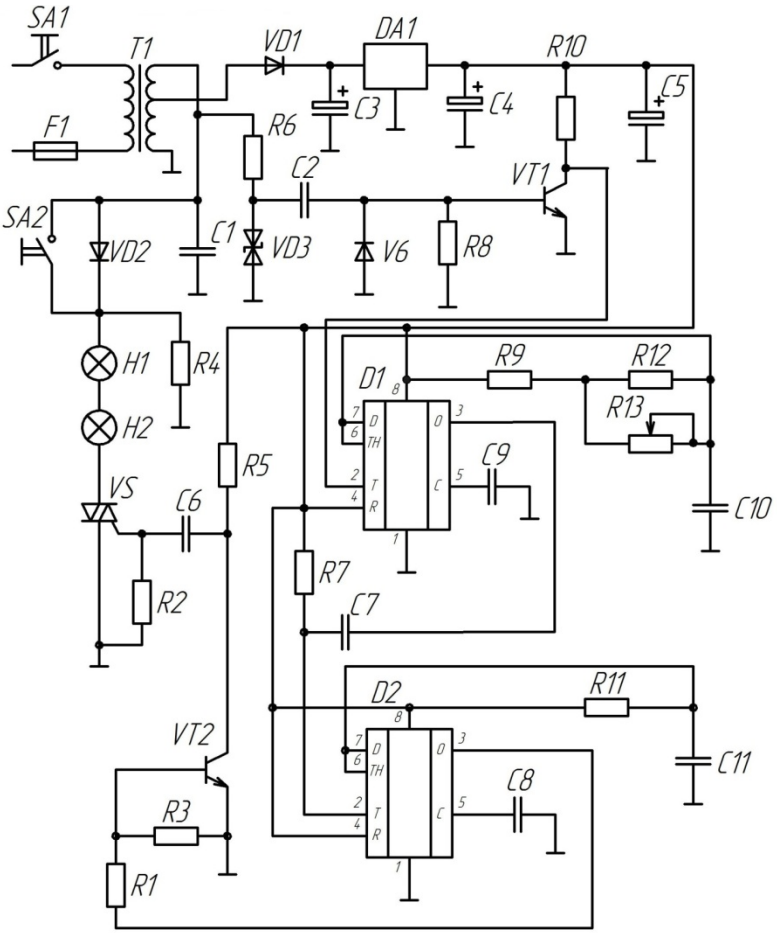


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя

Напряжение сети (220 В) понижается на трансформаторе T1 до величины порядка 20 В. Выходное напряжение трансформатора выпрямляется через диод VD1 и сглаживается конденсаторами C3 и C4. Интеграль-

ная схема DA1 необходима для стабилизации напряжения. Выходное напряжение DA1 (12 В) используется для питания блока управления.

Также со вторичной обмотки напряжение подается на ограничитель VD3, формирующий импульсы, форма которых близка к прямоугольной.

Этот импульс через дифференцирующую цепь R6, C2 поступает на транзистор VT1, который формирует короткий отрицательный импульс.

Последний запускает ждущий мультивибратор на таймере D1. Длительность импульсов таймера можно менять переменным резистором R13 в пределах от 10 до 19 мс. Выходной сигнал таймера D1 поступает на второй таймер D2, длительность импульсов которого строго фиксирована и равна половине периода сети (10 мс).

Импульсы со второго таймера через резистор R1 подаются на транзистор VT2. Транзистор формирует необходимый импульс тока, который поступает на управляющий электрод симистора через дифференцирующую цепь R2, C6. Изменяя длительность импульсов таймера D1, можно изменять момент включения симистора, то есть менять угол управления. С помощью тумблера S2 осуществляется переключение между режимом выпрямителя и регулятора мощности.

В результате выполнения работы была разработана принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя, собран лабораторный стенд для исследования управляемого выпрямителя.

Стенд был проверен в лаборатории измерительной техники на кафедре «Электротехника» и показал полную работоспособность. За счет использования в качестве переключающего диода симистора реализован также режим регулирования переменного напряжения.

В дальнейшем планируется использование данного стенда в лаборатории электроники, в частности при изучении дисциплины «Силовая электроника».

Список литературы

1. *Королев, Г. В.* Электронные устройства автоматики : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк. – 1991. – 256 с.

2. *Рама Редди, С.* Основы силовой электроники : произв.-практ. изд. – М. : Техносфера, 2006. – 288 с.

3. *Хоровиц, П.* Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М., 1986. – 600 с.

4. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы : справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.

I. A. Kapshunov, magister student
P. N. Ivanov, student
A. A. Shtin A.A., CSc in engineering, associate professor
E-mail: dev1-1188@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Stand for Studying Switching Diodes

The scheme of controlled rectifier on thyristors is offered. The description of the developed laboratory stand for the chosen control scheme of switched diodes is given.

Keywords: Controlled rectifier, thyristor, laboratory stand.

УДК 621.6-52

М. Н. Каракулов, д-р техн. наук, доц.
М. Г. Исупов, д-р техн. наук, доц.
А. С. Мельников, ст. преподаватель
Т. Ф. Гришина, ст. преподаватель
E-mail: tmm1978@bk.ru
Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

Опыт использования плунжерных передач с газомеханическим волнообразователем для управления приводами трубопроводной арматуры

Рассматриваются конструкции приводов на базе плунжерной передачи, позволяющие использовать потенциальную энергию транспортируемого по трубопроводу газа для управления арматурой. Приводятся примеры включения указанных приводов в систему газораспределения станций.

Ключевые слова: плунжерная передача, привод, управление, арматура.

Введение

Растущие требования промышленности к качеству приводов привели как к совершенствованию существующих, так и к созданию принципиально новых видов механических передач, обладающих совершенно новыми свойствами и качествами. Изобретение около 50

© Каракулов М. Н., Исупов М. Г., Мельников А. С., Гришина Т. Ф., 2018

лет назад волновой передачи привело к созданию механизмов нового класса, использующих для работы принцип деформирования гибких элементов, в отличие от классических передач, в принципе работы которых заложен рычажный эффект. К числу таких передач относятся и плунжерные передачи [1–2], привлекающие к себе пристальное внимание специалистов из различных отраслей промышленности. Основными преимуществами плунжерных передач являются: наличие нескольких зон зацепления, что приводит к увеличению коэффициента перекрытия и снижению удельной нагрузки на зуб; низкий уровень инерционности; относительно малый вес и габаритные размеры передачи; высокая долговечность по отношению к волновым передачам с гибкими зубчатыми колесами; возможность работы от различных источников энергии (электроэнергии, сжатого воздуха и жидкости).

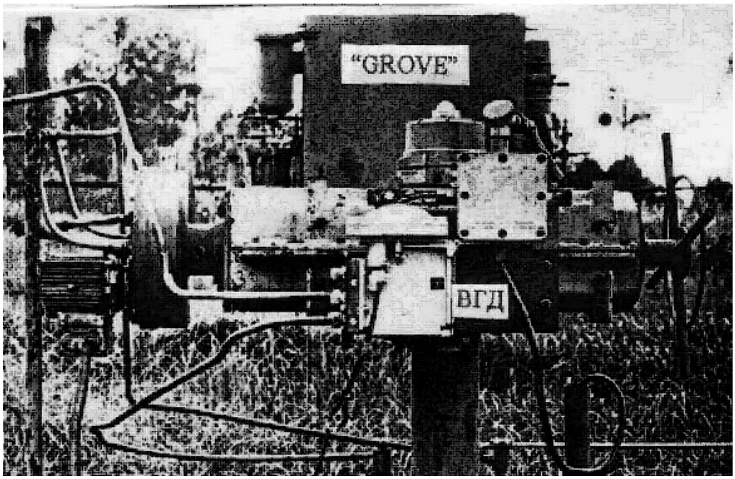


Рис. 1. Привод крана-регулятора на базе волновой передачи с ГЗК и газомеханическим волнообразователем

Сведения об аналогах и постановка задачи

В настоящее время накоплен определенный опыт по использованию аналогов волновых плунжерных передач – волновых передач с гибкими зубчатыми колесами (ГЗК) и газомеханическим волнообразователем, которые применяются в силовых волновых газовых двигателях (ВГД) общего и специального назначения. Большой вклад в развитие теории и практики волновых газовых двигателей внесли рос-

сийские ученые Е. Ф. Попков и И. Ф. Попков [3]. Ими разработана методика проектирования и созданы действующие приводы, нашедшие применение в качестве приводов кранов-регуляторов на газораспределительной станции (ГРС) в городах Можге (Удмуртская Республика) и Горнозаводске (Пермский край). На рис. 1 показан пример внедрения в привод крана-регулятора волнового газового двигателя на фоне поршневого привода фирмы Grove.

Самым слабым звеном ВГД является ГЗК. Срок е го службы очень низок вследствие того, что колесо имеет небольшую толщину, а изготовленные на нем зубья являются хорошими концентраторами напряжений, вследствие чего его разрушение происходит при сроках эксплуатации гораздо меньших, чем это оговаривается эксплуатирующей организацией.

Решение задачи

На фоне вышесказанного определенный интерес представляет конструкция приводов, оснащенных плунжерной передачей с газомеханическим волнообразователем. Одна из таких конструкций – плунжерный газогидравлический двигатель (ПГД) [4, 5] – показана на рис. 2.

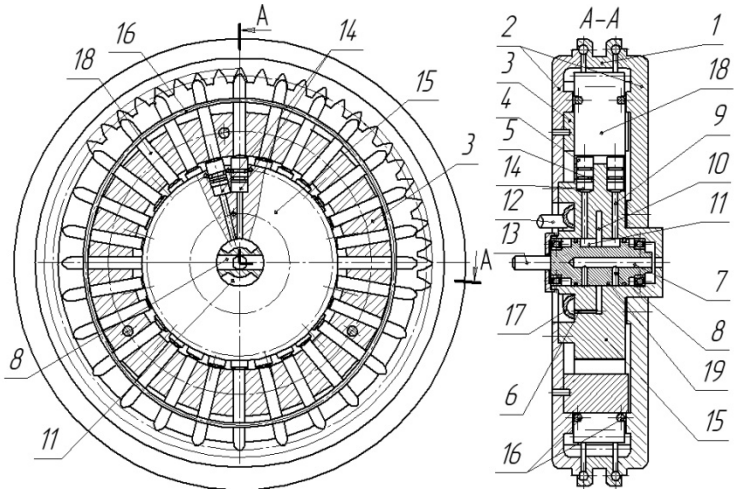


Рис. 2. Плунжерный газогидравлический двигатель (ПГД): *1* – жесткое зубчатое колесо, *2* – зубчатая муфта, *3* – сепаратор, *4* – поршни, *5* – уплотнения, *6* – осевые каналы, *7* – центральное отверстие распределителя, *8* – полости слива, *9* – радиальные каналы, *10* – проточка, *11* – канавки, *12* – штуцер подачи, *13* – распределитель, *14* – цилиндры, *15* – генератор, *16* – тросы, *17* – коллектор, *18* – плунжеры, *19* – центральное отверстие

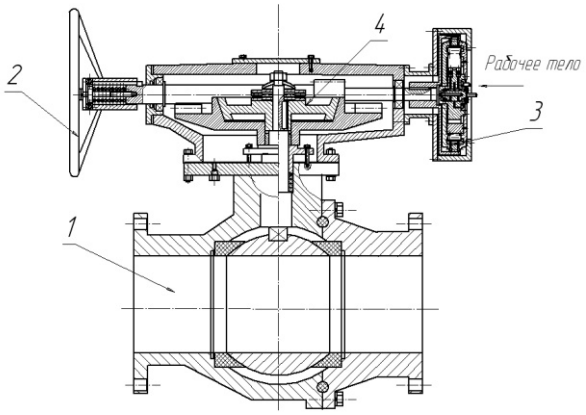


Рис. 3. ПГД с дополнительным узлом редуцирования на базе спироидной передачи: *1* – кран шаровый, *2* – ручной дублер, *3* – ПГД, 4 – спироидный редуктор

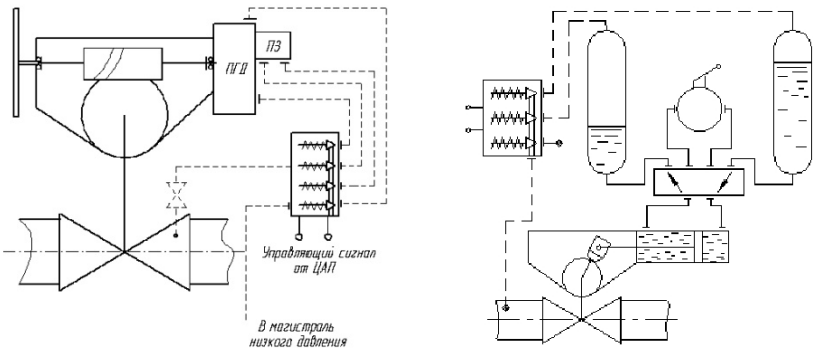
Двигатель содержит зубчатую муфту *2*, жестко закрепленную на генераторе волн *15* с равномерно расположенными по окружности цилиндрами *14*, с установленными в них поршнями *4*, в проточки которых вставлены уплотнения из синтетического материала *5*, и радиальными каналами *9*, соединяющими каждый цилиндр с центральным отверстием *19*, в котором установлен с возможностью вращения распределитель *13* в виде вала с полостями слива *8* и подачи, выполненной в виде канавок *11*, причем в стенках центрального отверстия *19* выполнены кольцевая проточка *10* и осевые каналы *6*, сообщающие кольцевую проточку *10* с радиальными каналами *9* в момент подачи в них рабочего тела.

Подвижное жесткое зубчатое колесо *1* соединяется с плунжерами *18* зубчатой муфтой *2*. Плунжеры *18* равномерно расположены по окружности и фиксируются от угловых перемещений друг относительно друга сепаратором *3*, жестко закрепленным на зубчатой муфте *2*, и от осевых перемещений – крышками корпуса, роль которых выполняют зубчатая муфта *2* и подвижное зубчатое колесо *1*. В пазы плунжеров *18* установлены гибкие металлические тросы *16*, рабочее тело подводится через штуцер подачи *12*, коллектор *17* и осевые каналы *6*.

Плунжерный газогидравлический двигатель работает следующим образом (рис. 3). При подводе рабочего тела из магистрали высокого давления (не показана) через штуцер *12*, коллектор *17*, осевые каналы *6*, кольцевую проточку *10*, канавки *11* распределителя *13*, радиальные каналы *9* в цилиндры *14*, которое заставляет поршни *4* совершать воз-

вратно-поступательное движение и деформировать гибкие металлические тросы *16*, с установленными на них плунжерами *18*, которые под действием поршней вступают в контакт с подвижным колесом *1* и зубчатой муфтой *2* и создают две диаметрально противоположные зоны зацепления, расположенные в одной плоскости, и при подаче на распределитель *13* от электромеханического преобразователя или управляемой турбины (не показаны) последовательных импульсов подвижное колесо *1* поворачивается на угол, пропорциональный числу командных импульсов. Плунжеры *18*, оказавшиеся в зоне слива, воздействуют на поршни *4* силой деформации гибких металлических тросов *16*, которые освобождают цилиндры *14* от рабочего тела через радиальные каналы *9*, полости слива *8* и центральное отверстие *7* распределителя *13* в магистраль низкого давления (на рисунке не показана).

В целях уменьшения габаритных размеров привода на базе плунжерной передачи с газомеханическим волнообразователем в ее конструкцию может вводиться дополнительная ступень редуцирования. Например, на рис. 3 показана конструкция привода, в котором в качестве такой дополнительной ступени используется редуктор со спироидной передачей. Такая конструкция позволяет получить два основных преимущества: первое – это уменьшение габаритных размеров, а второе – это, за счет применения спироидной передачи, возможность получения самоторможения на выходном валу привода, что обеспечивает его однозначное положение при отключении ПГД.



а *б*

Рис. 4. Принципиальные схемы включения в систему управления газопроводом приводов *GROVE* (*а*) и *ПГД-1* (*б*)

Результаты и их обсуждение

Для сравнения на рис. 4 представлена принципиальная схема включения в систему управления газопроводом исполнительного механизма фирмы Grove и исполнительного механизма с плунжерной передачей. Сравнение схем подключения привода на базе плунжерной передачи с аналогичным по назначению поршневым приводом позволяет сказать, что применение привода с ПГД не усложняет схему подключения и привод может использоваться с минимальной модернизацией прежней схемы управления газораспределением.

На газораспределительной станции, как правило, имеют место как магистральные газопроводы высокого давления, по которым происходит перекачка газа под давлением около 8,0 МПа (рис. 5), так и магистрали низкого давления, которые питают газом промышленные или гражданские объекты, по которым транспортируется газ под давлением примерно 2,0 МПа.

Характеристики опытных образцов ПГД

Наименование	Модуль, мм	Число плунжеров/кратность	Рабочее тело	Давление, МПа	Крут. момент, Нм
ПГД-1	4,0	27/2	Воздух	8,0	159,0
ПГД-2	2,5	35/2	Воздух	8,0	231,3

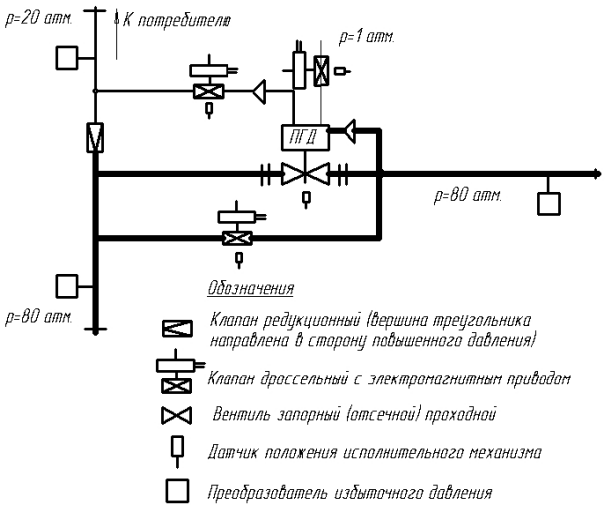


Рис. 5. Схема включения приводов с ПГД-1 при использовании их в качестве отсечной арматуры магистральных газопроводов

Для регулирования потока газа в магистральном газопроводе может использоваться этот перепад давлений. То есть рабочее тело под давлением 8,0 МПа подается к двигателю, а отработавший газ сбрасывается в магистраль под давлением 2,0 МПа. Управление включением и выключением привода может осуществляться дроссельными клапанами с электромагнитным приводом или автоматическими пневматическими устройствами (отсекателями). В том случае, когда вблизи отсутствует магистраль низкого давления, отработавшее рабочее тело может стравливаться и сжигаться за территорией станции.

Выводы

В настоящее время разработан и изготовлен широкий спектр опытных и промышленных образцов на базе плунжерной передачи, в том числе и на базе передач, оснащенных газомеханическим волнообразователем, технические характеристики которых представлены в таблице.

Результаты предварительных испытаний показали хорошую работоспособность изделий, созданных на базе плунжерной передачи с газомеханическим волнообразователем.

Список литературы

1. *Karakulov, M*. Features of design of a plunger transmission // Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium (Vienna, Austria, 22–25th October 2008). – Vol. 19. – No. 1. – Pp. 697–699.

2. *Karakulov M*. Geometrical synthesis of a plunger engagement // Proceedings of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai). – May 13–15, 2009, Japan, Matsushima. – 2009. – Pp. 98–103.

3. *Попков, Е. Ф*. Разработка ВГД для привода угла качания механизма штамповочного пресса / Е. Ф. Попков, И. Ф. Попков // Ученые ИМИ – производству / под ред. д. т. н., проф. В. И. Гольдфарба, д. т. н., проф. О. И. Шаврина. –Ижевск, 1992. – С. 42–45.

4. Плунжерный газогидравлический двигатель : пат. 2278979 Рос. Федерация / Попков Е. Ф., Попков И. Ф., Каракулов М. Н., Туранин Ю. В. – Заявл. от 22.11.04., опубл. 27.06.06, Бюл. № 18.

5. Плунжерный планетарный газогидродвигатель : пат. 2330161 Рос. Федерация : МПК F16 H 1/00 / Попков Е. Ф., Попков И. Ф., Каракулов М. Н. – № 2007108884, Приоритет 09.03.2007.

M. N. Karakulov, DSc in engineering, associate professor
M. G. Isupov, DSc in engineering, associate professor
A. S. Melnikov, senior lecturer
T. F. Grishina, senior lecturer
E-mail: tmm1978@bk.ru
Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Experience of the Use of Plunger Transmissions with a Gas-Mechanical Wave Generator to Control the Drives of Pipeline Valves

The design of drives with a plunger transmission is considered, which allows to use the potential energy of the gas transported through the pipeline to control the valve. Examples of including these drives in the gas distribution system of the stations are given.

Keywords: plunger transmission, drive, control, valve.

УДК621.313

К. В. Кожевников, магистрант
E-mail: konstantinkoj@gmail.com
И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Расширение функциональных возможностей источника питания асинхронного двигателя вентилятора и моделирование его работы

Проведена модернизация принципиальной электрической схемы источника питания асинхронного двигателя вентилятора. В NI Multisim выполнено ее моделирование, достигнуты требуемые параметры выходного напряжения.

Ключевые слова: источник питания, модернизация, электродвигатель, вентилятор, закон частотного регулирования, токовая пауза, автоматическое управление.

Введение

В настоящее время в подвижных объектах различного назначения для создания комфортных условий работы обслуживающего персонала

© К. В. Кожевников, И. В. Штенников, 2018

широко используются климатические системы и устройства. Они содержат комплекс оборудования, обеспечивающий подачу и перемещение воздушных потоков под принудительным воздействием определенного давления в требуемом направлении, тем самым обеспечивая необходимый микроклимат в рабочей зоне персонала. В состав этого оборудования входят: система фильтрации, рекуператор, вентилятор [1].

По мере эксплуатации климатических систем с течением времени происходит засорение фильтрующего элемента и, как следствие, снижение давления воздуха на выходе системы, ухудшая условия микроклимата и воздухообмена человека с окружающей средой [2].

Постановка задачи

Известно, что воздухообмен человека происходит оптимально при давлении, близком к атмосферному. Небольшие изменения содержания кислорода в составе воздуха и увеличение концентрации углекислого газа снижают работоспособность обслуживающего персонала, а при значительных отклонениях от нормы атмосфера становится опасной для жизнедеятельности человека.

Для поддержания заданного давления на выходе климатической системы в работе [3] предусматривалось регулирование скорости вращения вентилятора. Это осуществлялось при помощи регулирования частоты выходного напряжения в источнике питания асинхронного двигателя.

Однако при таком способе регулирования не изменялась амплитуда выходного напряжения, что приводило к нарушению закона частотного регулирования, потерям в работе электропривода, снижению КПД.

Принципиальная электрическая схема источника питания асинхронного двигателя [3] имела еще один недостаток – отсутствовала задержка времени при переключении силовых ключей, вызывая их перегрев.

В современных электроприводах регулирование скорости вращения осуществляется методом частотного регулирования [4].

Этот метод обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, сохраняя высокую жесткость механических характеристик двигателя. При этом регулирование скорости не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики [5].

При переключении силовых ключей важно помнить о бестоковой паузе – задержке переключения между транзисторами формирователя выходного сигнала с целью исключения короткого замыкания между

ними. В современных преобразователях частоты бестоковая пауза задается программными средствами, но также используются и специальные схемотехнические решения для силовых драйверов, в которых время задержки формируется RC-цепями [6].

Решение задачи

Модернизированный источник питания асинхронного двигателя вентилятора должен удовлетворять следующим параметрам:

– выходной ток – 2,4 А,

– выходное напряжение – переменное трехфазное 220±20 В,

– частота выходного напряжения – 400±40Гц,

– параметры питающей электросети – постоянного напряжения 27 В.

Принципиальная электрическая схема предлагаемого источника питания приведена на рис. 1.

В состав источника входят следующие узлы и блоки:

– A, B, C – формирователи трехфазного сигнала;

– D – блок управления напряжением;

– E – управляемый генератор импульсов;

– F –стабилизатор напряжения.

Для изменения выходного напряжения трансформаторов TV1-TV3, питающих асинхронный двигатель вентилятора, применена схема блока управления напряжением D, позволяющая обеспечить соблюдение закона частотного регулирования при изменении частоты выходного напряжения для поддержания заданного давления на выходе климатической установки.

Сигнал с датчика давления воздуха типа КРТ-5 через резистор R1 поступает на вывод *1* микросхемы DA1. С вывода *3* DA1 сигнал поступает на затвор транзистора VT1. На исток транзистора подается питающее напряжение 27 В. В зависимости от изменения уровня сигнала, поступаемого на DA1 с датчика давления воздуха, выходное напряжение на выводе *3* микросхемы DA1 меняется, что приводит к изменению напряжения на затворе транзистора VT1. При этом изменяется сопротивление канала сток-исток, а вместе с ним питающее напряжение силовых ключей VT2-VT7.

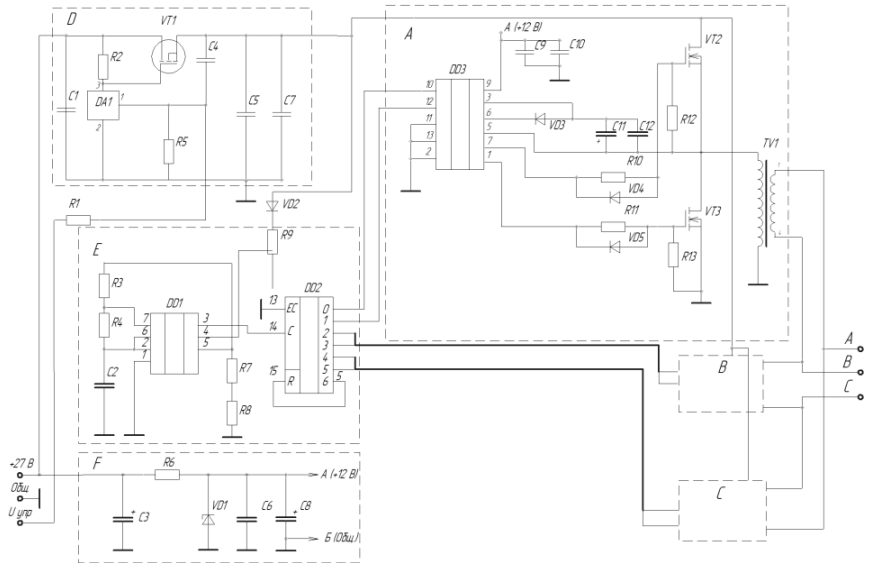


Рис. 1. Модернизированная принципиальная электрическая схема источника питания асинхронного двигателя вентилятора

Управляемый генератор E, выполненный на микросхеме КР1441ВИ1, формирует в номинальном режиме последовательность прямоугольных импульсов частотой 2400 Гц, скважностью 2. Параметры выходных импульсов задаются резисторами R3, R4, R7, R8 и конденсатором C2. Частота выходных импульсов изменяется в зависимости от выходного напряжения блока управления D, поступающего с его выхода через диод VD2 и резистор R9 на вывод *4* микросхемы DD1.

Применение блоков формирователей трехфазного напряжения A, B, C (рис. 2), включающих в себя драйверы, выполненные на микросхемах 1308ЕУ3, позволило создать бестоковую паузу, необходимую для безопасного переключения силовых ключей VT2-VT7.

Диод VD3 и конденсаторы C11, C12 совместно с микросхемой DD3 типа 1308ЕУ3 образуют усилитель. Когда на вывод *12* микросхемы DD3 поступает логическая единица и логический ноль на вывод *10* и открыт транзистор VT3, то конденсаторы C1 и C2 заряжаются до напряжения, соответствующего напряжению уровня логической единицы.

При логическом нуле на выводе *10* и логической единице на выводе *12* микросхемы DD3 заряд конденсаторов C1 и C2 используется как источник дополнительного напряжения, необходимый для открытия тран-

зистора VT2. Диоды VD4 и VD5 служат для разрядки накопленного заряда затворами транзисторов VT2 и VT3. Резисторы R1 и R2 ограничивают ток затворов транзисторов.

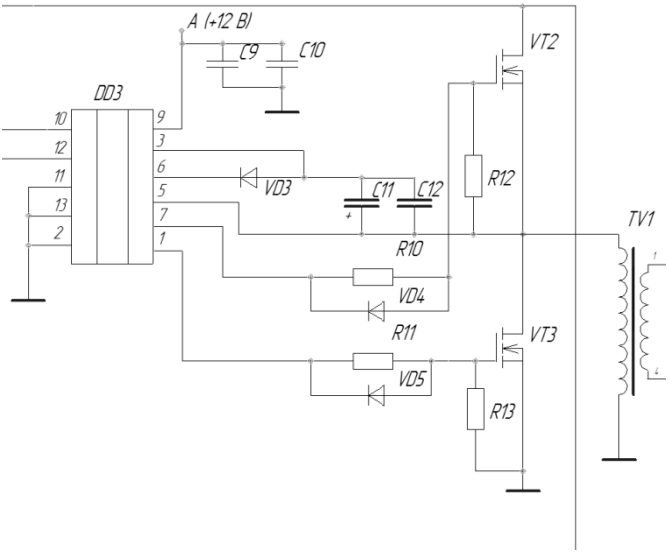


Рис. 2. Блок формирователя трехфазного сигнала

Результаты и их обсуждение

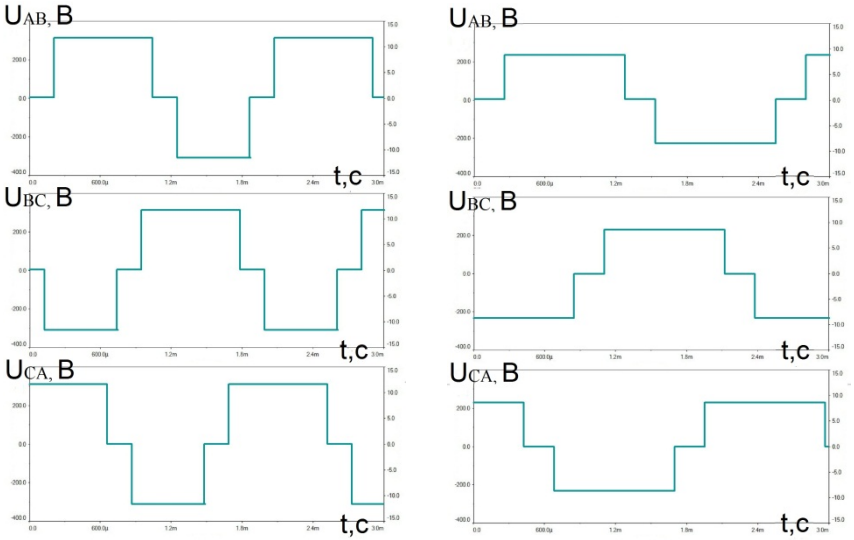
В программной среде NI Multisim проведено моделирование работы узлов и блоков модернизированной схемы источника питания асинхронного двигателя вентилятора.

Результаты моделирования представлены на рис. 3 в виде осциллограмм линейного напряжения при U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} при $U_{\text{вых}1} = 220$В, $f_1 =$ 400 Гц и $U_{\text{вых}2} = 180$В, $f_2 = 328$ Гц, соответственно.

Расчет отношения линейного напряжения $U_{\text{вых}}$ к частоте f показал соблюдение закона частотного регулирования:

$$\frac{U_{\text{вых}1}}{f_1} = \frac{220}{400} = 0,55, \quad \frac{U_{\text{вых}2}}{f_2} = \frac{180}{328} = 0,55.$$

Изменение амплитуды и частоты выходного напряжения происходит линейно.



а *б*

Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения источника питания асинхронного двигателя вентилятора: а – $U_{вых1}$ = 220В, f_1 = 400 Гц, б – $U_{вых2}$ = = 180В, f_2 = 328 Гц

Выводы

Проведенная модернизация схемы источника питания асинхронного двигателя вентилятора позволила соблюсти закон частотного регулирования, увеличить КПД электродвигателя, повысить надежность работы силовых ключей, снизив их перегрев вследствие создания токовой паузы на переключение.

Список литературы

1. *Максимов, Г. А.* Проектирование процессов кондиционирования воздуха. – М. : Высш. шк., 1961. – 99 с.

2. *Калинушкин, М. П.* Вентиляторные установки. – М. : Высш. шк., 1962. – 294 с.

3. *Кожевников, К. В.* Источник питания асинхронного двигателя вентилятора / К. В. Кожевников, И. В. Штенников // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 347–351.

4. *Башарин, А. В.* Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, Ленинград. отд-ние, 1982. – 392 с.

5. *Сидорчук, И. Н.* Частотные преобразователи [Электронный ресурс] // Насосы и принадлежности. Россия. – URL: http://nasos-pump.ru/chastotnye-preobrazovateli-invertor // (дата обращения: 17.11.2016).

6. *Лезнов, Б. С.* Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. – М. :Машиностроение, 2013. – 176 с.

K. V. Kozhevnikov, magister student
E-mail: konstantinkoj@gmail.com
I. V. Shtennikov, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Expansion of Functional Capabilities of Power Supply for the Fan Asynchronous Driver and the Modeling of Its Operation

We have developed the modernization of the principal electrical circuit of the power source of the induction motor of the fan has been carried out. In NI Multisim, its simulation is performed, the required parameters of the output voltage are achieved.

Keywords: Power supply, modernization, automatic control, electric fan, law of frequency regulation, current pause.

УДК 681.791.9

Н. С. Матросов, студент
E-mail: mnikitos95@mail.ru
В. А. Стародубцева, канд. техн. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Особенности использования современного высокоточного оборудования в металлообрабатывающих цехах

Разработан план подключения электрооборудования, выявлены особые условия эксплуатации лазерной установки.

Ключевые слова: лазерный станок, кабель, безопасность.

Металлообрабатывающий цех Ижевского механического завода выпускает зубчатые колеса, зубчатые рейки, шестеренки, а также производит заготовки из различного металла для дальнейшей обработки.

© Матросов Н. С., Стародубцева В. А., 2018

Для снижения стоимости изделий необходимо уменьшить количество операций при его обработке. Этого можно достигнуть путем более высокой точности среза металла. Для этой цели рекомендуется установить в цеху установку лазерной резки металла.

Лазерная обработка металла имеет следующие преимущества:

– высокая скорость выполнения операция по обработке;

– большое разнообразие процессов обработки самых различных видов материалов;

– высокое качество обработки;

– возможность высокоточной прецизионной обработки;

– селективность воздействия на отдельные участки обрабатываемой поверхности;

– большие возможности по автоматизации операций, способствующих существенному повышению производительности.

Для рассматриваемого цеха предлагается использовать лазерную установку «VOTOA223», которая служит исключительно для резки с высокой точностью деталей сложной конфигурации.

Подведение энергии и обеспечение техники безопасноти имеют ряд особенностей. Используем кабель марки ВВГнг, который не поддерживает горение, что немаловажно с точки зрения безопасности. Кроме того, выбор кабеля произведен исходя из его стоимости. К расчету сечения кабеля необходимо подходить особенно тщательно. Правильно выбранное сечение даст возможность проходить максимальному току по проводам без перегрева.

Расчет сечения по току для трехфазной сети:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi}, \tag{1}$$

$$I = \frac{48000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}8} = 91{,}27\ A,$$

где P – мощность лазерной установки, кВт; $\cos\phi$ – коэффициент мощности; U – напряжение в сети, В.

Выбираем кабель ВВГ 5×70. Любой проводник имеет сопротивление. Поэтому при достаточной длине кабеля происходит падение напряжения. Нормами ПЭУ установлено, что сечение кабеля должно обеспечивать потери тока не более 5 %. В случаях выше этой необходимо заменить кабель на кабель с более крупным сечением:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (R \cdot \cos\phi \cdot L + X \cdot \sin\phi \cdot L) \quad (2)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (0{,}265 \cdot 0{,}8 \cdot 70 + 0{,}082 \cdot 0{,}6 \cdot 70) = 31{,}68\,\text{В}$$

$$\Delta U(\%) = \frac{\Delta U}{U_{\text{лин}}}, \quad (3)$$

$$\Delta U(\%) = \frac{31{,}68}{380} = 0{,}08\ \%,$$

где R – удельное активное сопротивление одной жилы по данным производителя кабеля 0,265 Ом/км; X – удельное индуктивное сопротивление одной жилы по данным производителя кабеля 0,082 Ом/км; $\cos\phi = 0{,}8$; $\sin\phi = 0{,}6$.

Падение напряжения не превышают 5 % .Заменять кабель нет необходимости.

Исходя из установленной мощности установки, номинального тока и подводимого напряжения выбираем автоматический выключатель, который располагается в распределительном пункте.

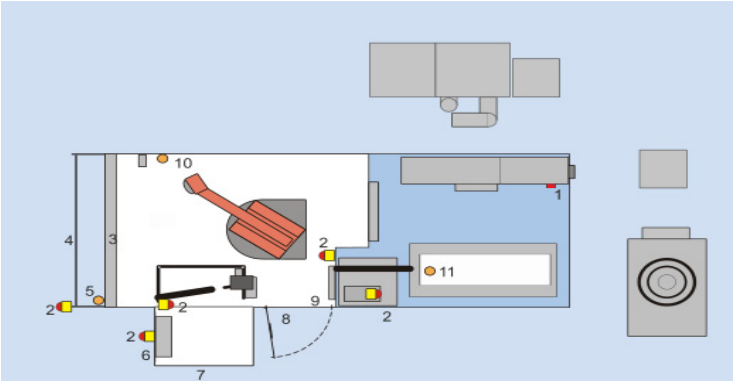
Выбираем вводной трехполюсный автоматический выключатель NSX400N. Номинальный ток 400 А, номинальное напряжение 690 В, максимальная отключающая способность 50 кА.

Автоматический трехполюсный выключатель для лазерной установки NSX160N. Номинальный ток 160 А, номинальное напряжение 690 В, максимальная отключающая способность 50 кА, количество полюсов 3.

Концепция безопасности лазерной установки базируется в особенности на закрытии опасной зоны (технологическая кабина, область комплектации и изъятия), блокировке (дверь кабины) и автоматическом распознавании появления персонала или предметов в областях, имеющих значение для безопасности (световая завеса). За счет комбинации данных элементов в нормальной эксплуатации гарантируется хорошая защита для персонала.

Общая концепция безопасности включает в себя: открытие защитных дверей только при остановленной машине или с помощью ключа. Защитные двери разрешается открывать только проинструктированному персоналу с помощью ключа. Закрытое состояние всех защитных дверей контролируется. В опасных ситуациях установку можно сразу остановить через устройство аварийного останова.

Локализация всех предохранительных устройств представлена на рисунке.



Предохранительные устройства на лазерной установке VOTOA A 223: *1* – автоматический выключатель; *2* – клавиша аварийного останова; *3* – заслонка лазерного луча; *4* – световая завеса; *5* – сигнальная лампа лазера; *6* – замок выключателя; *7* – смотровое окно; *8* – дверь в кабину; *9* – замок безопасности; *10* – сигнальная лампа; *11* – сигнальная лампа

Автоматический выключатель установки находится на электрошкафу. Приводит установку в работу.

Клавиша аварийного останова *2*, которая включает аварийный останов всей установки, находится на месте комплектации. Заслонка лазерного луча с планкой узла включения и смотровым окном из защитного стекла *3* закрывает технологическую кабину во время обработки заготовки в наружном направлении. Смотровое окно в заслонке лазерного луча позволяет наблюдать за процессом в технологической кабине. На нижней кромке заслонки лазерного луча находится планка узла включения. Если она срабатывает (например, в результате вмешательства оператора в путь движения закрывающейся заслонки лазерного луча), то заслонка лазерного луча снова открывается.

Световая завеса *4* находится снаружи, перед заслонкой лазерного луча. При нарушении активированной световой завесы (например, когда оператор проходит через нее) движение заслонки лазерного луча останавливается.

Сигнальная лампа лазера *5* находится снаружи установки, позволяет наблюдать за работой лазера.

Электромагнитно запертую дверь можно открывать замком выключателя *6*, только если она была активирована системой управления установки. Смотровое стекло в заслонке лазерного луча *7* позволяет наблюдать за процессом в технологической кабине.

Технологическая кабина *8* защищает помещение обработки во время обработки заготовки в направлении наружу.

Появление лазерных лучей обрабатывающего лазера в технологической кабине возможно, только если контур безопасности лазера лазерной установки замкнут. Элементами, образующими контур безопасности лазерной установки, являются: контур аварийного останова установки, замок безопасности двери в кабину, замок безопасности сервисной двери.

Таким образом, расмотрены особенности использования лазерной установки с точки зрения безопасной эксплуатации, произведен расчет и выбор питающего кабеля, выявлен ряд преимуществ обработки металла с помощью лазера.

Список литературы

1. *Крупович, В. И.* Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самоверова. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 408 с.

2. *Алиев, И. И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с.

3. *Штерн, В. И.* Монтаж и испытание аппаратуры и проводов вторичных цепей электроустановок. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.

N. S. Matrosov, student
E-mail: mnikitos95@mail.ru
V. A. Starodubtseva, CSc in engineering, associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Features of the Use of Modern High-Precision Equipment in Metalworking Shops

The plan is developed for connecting electrical equipment, specific conditions of the laser installation operation are identified.

Keywords: laser machine, cable, safety.

УДК 621.312

Б. С. Петров, Е. Я. Ардашев, магистранты
А. Е. Фокеев, канд. техн. наук, доц.
E-mail: mcsvyatoi@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Анализ функциональных возможностей современных микропроцессорных счетчиков электрической энергии

Выполнен анализ функциональных возможностей приборов учета электрической энергии в части измерения характеристик напряжения и тока применительно к решению задачи учета дополнительных потерь от высших гармоник в элементах электрической сети.

Ключевые слова: прибор учета электрической энергии, высшие гармоники.

Введение

Возможности приборов контроля и учета, аппаратов защиты, устройств телеметрии и измерения, применяемых в электрических сетях, постоянно расширяются. Сильное влияние на этот процесс оказывает политика смартизации [1] подстанций и электрических сетей.

Расширение технических возможностей приборов учета электрической энергии позволяет решать современные актуальные задачи, среди которых выделяются: задача мониторинга показателей качества электрической энергии, задача выявления потребителей, ухудшающих показатели качества электрической энергии, и задача учета дополнительных потерь активной мощности от высших гармоник тока и напряжения.

Измерение показателей качества электрической энергии

Контроль качества электрической энергии подразумевает оценку измеренных значений показателей качества на соответствие установленным нормам. Анализ показателей качества электрической энергии и отдельных характеристик напряжения направлен на выявление потребителей и электроприемников, ухудшающих показатели качества электрической энергии, и разработку мероприятий по повышению качества электрической энергии.

© Петров Б. С., Ардашев Е. Я., Фокеев А. Е., 2018

Вследствие того, что большинство процессов, протекающих в электрических сетях, – быстротекущие, все нормируемые показатели качества электрической энергии не могут быть измерены напрямую – их необходимо рассчитывать, а окончательное заключение можно дать только по статистически обработанным результатам. Поэтому для определения показателей качества электрической энергии необходимо выполнить большой объем измерений с высокой скоростью и статистической обработкой измеренных значений. Наибольший поток измерений необходим для определения несинусоидальности напряжения и тока.

Для реализации измерения показателей качества электрической энергии в пределах допустимых погрешностей требуется выполнять измерения мгновенных значений трех междуфазных напряжений 256 раз за период (3·256·50 = 38 400 в секунду) [2].

Выявление потребителей, искажающих показатели качества электрической энергии.

Алгоритм вычисления потребляемой электрической энергии и мощности P предусматривает вычисление произведения мгновенных значений тока и напряжения.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

$$P = \int_{t=0}^{T} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (2)$$

где $p(t)$ – значение мгновенной мощности; $u(t)$ – значение мгновенного напряжения; $i(t)$ – значение мгновенного тока; P – значение активной мощности.

Отклонения напряжения практически не влияют на показания приборов учета электрической энергии в широком диапазоне напряжений. Влияние высших гармоник на измерение электрической энергии и мощности исследовано достаточно полно [3], и механизм их влияния известен.

Потребители, имеющие в своем составе электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой и потребляющие несинусоидальный ток, влияют на процесс потребления электрической энергии и мощности потребителей, подключенных к электрической сети.

Методика определения причин ухудшения качества электрической энергии приведена в методических указаниях по контролю и анализу ка-

чества электроэнергии [4]. Она устанавливает методы анализа качества электрической энергии и методики измерений показателей качества в системах электроснабжения общего назначения однофазного и трехфазного переменного тока частотой 50 Гц с целью выявления причин несоответствия установленным требованиям к показателям качества.

Для определения источника искажений требуется измерение показателей качества электрической энергии, мгновенных значений фазных токов, фазовых углов сдвига высших гармонических составляющих напряжения и активных мощностей высших гармоник.

Учет потерь от высших гармоник тока и напряжения

Проблема влияния высших гармоник на элементы электрической сети не является новой. Например, в работе [5] представлены методы расчета дополнительных потерь от высшх гармоник тока и напряжения в силовых трансформаторах, линиях электропередач, электрических машинах, фильтр-компенсирующих устройствах и конденсаторных установках.

Для расчета дополнительных потерь от высших гармоник тока и напряжения требуется измерение и регистрация коэффициентов искажения синусоидальности кривой напряжения и тока, значения *n*-х гармонических составляющих тока (в амперах) и напряжения (в вольтах). Возможности некоторых приборов учета электрической энергии приведены в таблице.

Возможности приборов учета электрической энергии в части измерения характеристик тока и напряжения

Характеристики напряжение и тока	СЭТ-4ТМ	ABB DELTAmax	Энергомера CE308-R32 DLMS
Отклонение напряжения (ПКЭ)	+	+	+
Отклонение частоты (ПКЭ)	+	+	+
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (ПКЭ)	+	+	+
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности (ПКЭ)	+	+	+
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения (ПКЭ)	+	+	+
Коэффициент *n*-й гармонической составляющей напряжения (ПКЭ)	+	+	–

Окончание табл.

Характеристики напряжение и тока	СЭТ-4ТМ	ABB DELTAmax	Энергомера CE308-R32 DLMS
Значение *n*-й гармонической составляющей напряжения, В	–	+	–
Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока	+	+	–
Коэффициент *n*-й гармонической составляющей тока	+	+	–
Значение тока *n*-й гармоники тока, А	–	+	–
Порядок регистрируемой гармоники	40	31	21
Фазовые углы сдвига гармоник напряжения	–	–	–
Активная мощность *n*-й гармонической составляющей	–	–	–

Выводы

Из данных таблицы следует, что не все приборы учета электрической энергии способны измерять и регистрировать полную номенклатуру показателей качества электрической энергии, значения гармонических составляющих тока (в амперах) и напряжения (в вольтах), необходимых для расчета дополнительных потерь от высших гармоник в элементах электрической сети. Современные приборы учета электрической энергии позволяют измерять основные характеристики напряжения и тока, с помощью которых возможен расчет дополнительных потерь от высших гармоник тока и напряжения в элементах электрической сети. Алгоритм расчета дополнительных потерь может быть интегрирован в приборы учета электрической энергии.

Измерение фазовых углов сдвига высших гармонических составляющих напряжения и активной мощности высших гармонических составляющих в современных приборах учета не реализовано. Реализация измерения этих параметров в современных микропроцессорных приборах учета возможна, но потребует использования дополнительных вычислительных мощностей и памяти прибора учета. Для выявления потребителей, ухудшающих качество электрической энергии, применяются специальные измерительные комплексы – анализаторы качества.

Список литературы

1. *Шилин, А. Н.* Интеллектуальные электрические сети: проблемы и решения / А. Н. Шилин, А. А. Шилин // Известия ВолгГТУ. – 2011 – № 8 – С. 84–88.

2. *Железко, Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – М. : ЭНАС, 2009. – 456 с.

3. *Киселев, В. В.* Влияние несинусоидальности напряжения и тока на работу электронных счетчиков электроэнергии / В. В. Киселев, И. С. Пономаренко // Промышленная энергетика. – 2004. – № 2. – С. 40–45.

4. РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – 2002.– 64 с.

5. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер, А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов, Д. Г. Сафонов, В. Т. Черемисин // Омский научный вестник. – № 2 (120). – 2013. – С. 178–183.

B. S. Petrov, E. Ya. Ardashev, magister students
A. E. Fokeev, CSc in engineering, associate professor
E-mail: mcsvyatoi@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Analysis of the Functional Capabilities of Modern Microprocessor Energy Meters

The analysis of the functional capabilities of metering devices of electric energy in terms of measuring the characteristics of voltage and current, in relation to the problem of accounting for additional losses from higher harmonics in the elements of the electrical network is presented.

Keywords: electric energy metering device, higher harmonics.

УДК 74.584(2)3

О. В. Пиманова, ст. преподаватель
E-mail: pimanova_o_v@istu.ru, olga22021961@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование уровня адаптированности студентов второго курса

В статье рассмотрены проблемы адаптации студентов в течение года. Проведены тестирования студентов. Сделаны выводы.

Ключевые слова: мотивация, адаптация, аккомодация, ассимиляция, адаптированность.

Успеваемость первокурсников зависит от адаптации их в новом образовательном пространстве при поступлении в вуз. В. А. Якунина [1] под адаптацией понимает процесс взаимодействия человека и среды, в результате которого у него возникает поведение согласно меняющимся в этой среде условиям.

Первокурснику надо привыкнуть к новому коллективу студентов, преподавателей, методикам преподавания, оценивания. Оторванность от родителей, школьного круга общения, неумение планировать денежный бюджет, время работы и отдыха, слабый контроль посещаемости – все это приводит к возникновению психологических трудностей. Проблемы, возникающие при профессиональной, социальной, психологической, дидактической, биологической адаптации, рассмотрены в работе [2]. Адаптацию можно поделить на несколько этапов:

1) две недели продолжается физиологическая адаптация;

2) два месяца занимает психологическая адаптация;

3) более длительный период (до трех лет) длится социально-психологическая адаптация [3].

Исследователи проблем адаптации рассматривают четыре стадии при адаптации студентов-первокурсников:

1. Начальная стадия, когда студент осознает, как он должен вести себя в новой среде, но не готов принять систему ценностей нового окружения, придерживается старой системы.

© Пиманова О. В., 2018

2. Стадия терпимости.

3. Аккомодация – признание и принятие студентом системы ценностей нового окружения, и среда признает ценности индивида.

4. Ассимиляция – полное совпадение систем ценностей студента и окружающей среды.

Дезадаптация проявляется в ощущении внутреннего дискомфорта, напряженности, чувства тревоги, заниженной самооценке, отсутствии уверенности в себе, что отражается на успеваемости и психическом здоровье.

В процессе адаптации достигается адаптированность личности. Высокий уровень адаптированности личности наступает при активном изменении себя и окружающей среды. Средняя адаптация личности происходит при внешнем приспособлении студента. Низкий уровень адаптированности студентов характерен при отказе от взаимодействия с внешней средой и уходе в свой внутренний мир.

На адаптацию к обучению в вузе влияет:

1) социологический фактор: возраст студента, его социальное происхождение, учебное заведение, которое он закончил;

2) социально-психологической фактор: интеллект, адаптационный потенциал личности, статус в группе;

3) педагогический фактор: педагогический уровень преподавателей, уровень среды, материально-технической базы.

В процессе адаптации важную роль играет институт кураторов и помощников кураторов. Помощники кураторов выбираются из студентов старших курсов, желающих работать с первокурсниками.

В группеБ03-831-1 направления «Электроэнергетика и электротехника» проводилось тестирование: входное (в первом семестре), после сессии (во втором семестре) и итоговое (в третьем семестре). Тест содержал восемь вопросов, акцент делался на удовлетворенность студентов разными сторонами жизни в вузе. Сделаем анализ.

Вопрос 1: Трудно ли вам было привыкнуть к студенческой жизни?

Часть студентов (23 %) ответили, что адаптация была трудной и долгой. На протяжении первого года обучения происходит вхождение студента в коллектив, формируются навыки и умения учебной деятельности, осознается выбранная профессия, формируется новый режим труда, отдыха, жилищного быта.

Большая часть студентов (59 %) ответили, что процесс адаптации был нетрудным, недолгим, т. е. эти студенты имели большой адаптационный потенциал, и это помогло им быстро войти в новую образо-

вательную среду. Была часть студентов (14 %), которая сразу вошла в новую среду и почувствовала себя студентами.

Вопрос 2: Какова ваша удовлетворенность студенческой жизнью?

Полностью довольны 19 % респондентов, большая часть (59 %) удовлетворены частично, а 22 % студентов полностью неудовлетворенны. У этих студентов процесс адаптации был долгим и сложным. Была исследована удовлетворенность студентов в различных аспектах студенческой жизни, чтобы выявить проблемные стороны. Результаты представлены в табл. 1.

Вопрос 3: Какова ваша удовлетворенность различными сторонами вузовской жизни?

Таблица 1. **Удовлетворенность студентов жизнью в вузе**

Аспекты студенческой жизни	Да, %	Не очень, %	Нет, %
Удовлетворены ли вы:			
1. Набором и содержанием учебных дисциплин	37	33	30
2. Организацией учебного процесса	55	32	13
3. Своими результатами в сессию	27	59	14
4. Качеством преподавания	73	19	8
5. Обеспеченностью учебно-методической литературой	64	23	13
6. Технической оснащенностью аудитории	54	27	19
7. Отношениями с преподавателями	50	32	18
8. Отношениями в группе	75	25	–
9. Бытовыми условиями в ИжГТУ	46	46	8
10. Бытовыми условиями в общежитии	46	23	31
11. Условиями питания в ИжГТУ	46	32	22
12. Условиями для полноценного досуга	50	41	9
13. Организацией массовых мероприятий	46	40	14
14. Возможностями заниматься спортом	44	32	24
15. Возможностями для художественного творчества	41	23	36

Проведем ранжирование удовлетворенности студентов. Наибольший процент (75 %) – удовлетворенность студентов отношениями в группе, т. е. сформированы отношения между студентами, образовался коллектив, в котором комфортно учиться. Качество преподавания – 73 %. Конечно, ИжГТУ имеет научный, творческий, профессорско-

преподавательский состав, способный решать технические, научные проблемы, соответствующий новым веяниям техники и науки, который может находить контакт с молодежью. Довольны отношениями с преподавателями 50 % студентов. Выявлена низкая удовлетворенность студентов (37 %) набором и содержанием учебных дисциплин. Расписание занятий бывает неудобным, с большим количеством пар сложных предметов. Необходимо пересматривать учебные курсы, улучшать техническую оснащенность аудиторий (54 % студентов довольны).

Особо хочется выделить бытовые условия в ИжГТУ, в общежитии, условия питания и отдыха, которые необходимо кардинально менять, выходить на уровни мировых стандартов. В организации массовых мероприятий, возможностях заниматься спортом, художественным творчеством еще есть резерв, и его надо использовать.

Далее исследования проводились в области мотивации поступления в ИжГТУ. Результаты представлены в табл. 2.

Вопрос 4:Что побудило вас поступить в ИжГТУ?

Таблица 2. **Мотивы поступления в ИжГТУ**

Мотивы	Ранг, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Интерес к профессии	14	9	4,5	4,5	4,5	4,5	9,1	-	9,1	9,1	-
2. Привлекла перспектива найти хорошую работу после окончания ИжГТУ		9,1	4,5	4,5	4,5	-	-	4,5	4,5	32	-
3. Привлек престиж ИжГТУ	9,1	4,5	4,5	4	5	4,5	4,5	9	13,6	4,5	4,5
4. Желание получить диплом (неважно где)	4,5	9	14,5	-	18,2	-	4,5	4,5	4,5		1
5. Считаю, что наилучшие способности в этой области	14	-	-	-	9,1	9,1	9,1	14	-	4,5	4,5
6. Не хотелось идти в армию	37	-	-	-	5	9	14	5	-	14	14
7. Повлияла учеба в специализированном классе, техникуме, лицее	32	-	-	5	5	14	5				5
8. Повлияла семейная традиция, родители	23	5	-	5	14	5	9	14	5	-	5

Продолжение табл. 2

Мотивы	Ранг, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9. Хотелось продлить беззаботный период жизни	23	9	9	-	-	9	-	9	9	5	-
10. Совет учителя, специалистов по профориентации	18	5	5	14	9	-	5	-	5	-	5
11. Другие мотивы	9	14	5	5	5	5	-	-	-	5	18

Анализируя мотивационные составляющие, наибольшему проценту (37 %) не хотелось идти в армию, что является слабой мотивацией для поступления на эту специальность. Следующий мотив, более весомый, это влияние учебы в специализированных классах, лицеях, техникумах – 32 %. Следующие 23 % студентов поступили, чтобы продлить беззаботный период жизни. Это означает незрелость студента как личности. Влияние родителей, семейной традиции – 23 %. Часть студентов (18 %) поступили по совету учителей, специалистов по профориентации. Очень низок процент (14 %) поступивших по из-за интереса к профессии, такой же процент – из-за наилучших способностей в этой области. Желательно, чтобы процент этих студентов увеличивался. Следующим вопросом выясняли, какие условия, люди помогли адаптироваться в новой социальной среде. Результаты представлены в табл.3.

Вопрос 5: Кто или что помогло вам адаптироваться в новой социальной роли студента?

Таблица 3. **Помощники в процессе адаптации**

Варианты ответов	Количество ответивших, %
1. Куратор	14
2. Однокурсники	32
3. Старшекурсники	23
4. Преподаватели	22
5. Массовые мероприятия	18
6. Друзья, подруги, знакомые	50
7. Никто и ничто	32
8. Совместное участие в смотрах, соревнованиях	9
9. Другое	4,5

Из таблицы видно, что большую помощь в адаптации оказали друзья, подруги, знакомые, однокурсники, старшекурсники, помощники кураторов. Эти ребята в первые недели учебы отвечали на множество студенческих вопросов, бытовых, учебных, организационных. Роль куратора в адаптивном процессе не так значительна, как хотелось.

Вопрос 6: С чем вы соотносите жизненный успех?

В табл. 4 представлены результаты анкетирования. Студенты правильно сориентированы на непреходящие ценности: хорошие и верные друзья – 86 %, счастливая семейная жизнь – 82 %, высокий заработок и материальное благополучие – 54 %, карьера, высокая квалификация, общественное признание, наличие своего дела, творческая самореализация – 32 %.

Таблица 4. **Жизненный успех в студенческом понимании**

Варианты ответов	Количество ответивших, %
1. Со счастливой семейной жизнью	82
2. С хорошими и верными друзьями	86
3. С высоким заработком, материальным благополучием	54
4. С карьерой	37
5. С творческой самореализацией	32
6. С высокой квалификацией	36,4
7. С общественным признанием	32
8. С наличием своего дела, бизнеса	32
9. С достижениями в науке	14
10. С обретением власти	4,5

Вопрос 7: Что вызвало наибольшие проблемы в студенческой жизни?

Анализ табл. 5 показывает, что на первом году обучения наибольшими проблемами являлись: недостаток свободного времени (64 %), перегруженность учебными занятиями, неудобное расписание (59 %), недостаточный уровень подготовки (23 %), отсутствие привычного круга общения (18 %) , нехватка средств и неумение их расходовать (14 %), невозможность найти любимое занятие (14 %).

Таблица 5. **Проблемы в студенческой жизни**

Варианты ответов	Количество ответивших, %
1. Недостаток свободного времени	64
2. Перегруженность учебными занятиями, неудобное расписание	59
3. Недостаточный уровень подготовки	23
4. Неумение организовать себя	23
5. Особых проблем не было	12
6. Нехватка средств, неумение их расходовать	14
7. Отсутствие привычного круга общения	18
8. Невозможность найти занятие по душе, интересное дело	13,6
9. Мало внимания со стороны куратора	4,5
10. Низкая техническая оснащенность кабинетов	–
11. Плохие санитарно-гигиенические условия	4,5
12. Сложно привыкнуть к новой обстановке, сходиться с новыми людьми	–
13. Низкое качество преподавания	4,5
14. Другое	4,5

Вопрос 8: Как Вы оцениваете студенческие отношения в группе?

Из ответов, представленных в табл. 6, видно, что сложился дружный коллектив. Это подтверждают ответы на вопрос: 82 % студентов довольны отношениями в группе. С такими ребятами можно учиться, овладевать специальностью, они поддержат, помогут, ободрят неуверенных в себе студентов.

Таблица 6. Отношения студентов в группе

Варианты ответов	Количество ответивших, %
1. Сложился дружный коллектив	82
2. Выделились активные студенты, но большинство пассивные	46
3. Все разделились на компании	13,2
4. Равнодушные, у многих интересы не в группе	9
5. Присутствуют конфликтные ситуации	4,5

По результатам исследований видно, что адаптационный процесс близок к завершению. Студенты готовы к самореализации, занятию наукой, имеют высокую успеваемость и хорошее качество полученных знаний. Однако в группе есть и неадаптированные студенты (9 %), с низкой успеваемостью, с задолженностями по первому году обучения. Решение проблемы адаптации позволит избежать отчисления с первого курса, приучить самостоятельно работать, воплощать в жизнь свои планы.

Список литературы

1. Проблемы педагогического образования : сб. науч. ст. Вып. 20 / под ред. В. А. Сластенина, Е. А. Левановой. – М. : МПГУ МОСПИ, 2005.

2. *Пиманова, О. В*. Анализ успеваемости студентов по дисциплине «Электротехника и электроника»// Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства (Ижевск, 12–14 нояб. 2014 г.) : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. – Ижевск, 2014. – С. 310–314.

3. *Симаева, И. Н*. Эмоции как индикатор адаптации // Проблемы педагогического образования : сб. науч. ст. Вып. 20 / под ред. В. А. Сластенина, Е. А. Левановой. – М. : МПГУ МОСПИ, 2005.

4. Особенности адаптации студентов первого курса к обучению в вузе [Электронный ресурс] // Управление организационно-воспитательной работы со студентами ИжГТУ. – URL: http://uovr.istu.ru/curator/p-adaptation.html

O. V. Pimanova, senior lecturer
E-mail: pimanova_o_v@istu.ru, olga22021961@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

A Study of the Adaptation of Second-Year Students

The article considers the problems of adaptation during the year. Testing of first year students. Conclusions are made.

Keywords: motivation, adaptation, accommodation, assimilation, adaptation.

УДК 621.313.13

И. Д. Родионов, магистрант
E-mail: rodionov.94@mail.ru
А. В. Морозов, ст. преподаватель
E-mail: avmoroz16@ramblerl.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Проектирование электродвигателя навесного оборудования унифицированной машины технологического электротранспорта

Целью научной работы является проектирование электродвигателя для унифицированной машины технологического электротранспорта (УМТЭТ) на базе имеющегося двигателя АДТ-6с. В работе рассмотрены вопросы оптимизации массогабаритных и энергетических показателей.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, частотное регулирование, оптимизация, насыщение, СПРУТ-АЭД.

Введение

Разнообразное применение асинхронных машин для разных условий работы и разных режимов нагрузки выдвигает особые требования к проектированию с целью создания высокотехнологичных, надежных и экономичных асинхронных электродвигателей (АД).

Сведения из теории

При разработке электродвигателей, предназначенных для работы в широком диапазоне изменения частоты питающего напряжения, возникает задача оптимизации их параметров. Во время работы двигателей на различных частотах возникает проблема изменения степени насыщения магнитопровода, а как следствие – его нагрев и снижение КПД. Явление вытеснения тока в обмотке ротора влияет на потери в роторе, вызывая дополнительный нагрев, а изменение индуктивной составляющей обмотки ротора влияет на cosφ [1]. Особенно существенно это влияние в АД регулируемых электроприводов, работающих в широких диапазонах изменения частоты вращения [2].

Целью работы является проектирование электродвигателя привода цилиндрической снегоочистительной щетки аккумуляторной машины

© Родионов И. Д., Морозов А. В., 2018

на базе двигателя АДТ-6с с использованием программного комплекса СПРУТ-АЭД.

Решение задачи

Исходя из заданных параметров работы навесного оборудования определим мощность разрабатываемого электродвигателя по формуле

$$N = \frac{\sum W \cdot \sum \upsilon}{\eta_{щ} \cdot 1000} = \frac{713{,}5 \cdot 4{,}17}{0{,}75 \cdot 1000} = 4 \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $\sum W$ – суммарное сопротивление при работе щетки в проекции на ось движения машины, Н; $\sum \upsilon$ – суммарная скорость волочения щетки по покрытию, м/с; $\eta_{щ}$ – коэффициент полезного действия вращающихся частей щетки. Электродвигатель навесного оборудования рассчитываем на основе тягового электродвигателя УМТЭТ АДТ-6с с параметрами $U = 48$ В, $P = 6$ кВт, $n = 3000$ об/мин.

При проектировании электродвигателя существует проблема насыщения магнитной цепи двигателя при изменении частоты питающего напряжения, для решения которой проведен анализ зависимости между длиной воздушного зазора и параметрами магнитной цепи. Оптимальную длину воздушного зазора определяем исходя из условия, что полезная мощность P_2 прямо пропорциональна длине воздушного зазора электродвигателя. Обозначим P_2, $l_{\delta 2}$ – мощность и длина проектируемого двигателя, P_1 и $l_{\delta 1}$ – мощность и длина аналога.

Из пропорции $\frac{P_2}{P_1} = \frac{l_{\delta 2}}{l_{\delta 1}}$ предварительно определяем длину воздушного зазора:

$$l_{\delta 2} = \frac{P_2}{P_1} \cdot l_{\delta 1} = \frac{5000}{6000} \cdot 160 = 133 \text{ мм}. \quad (2)$$

Для рассчитанной длины воздушного зазора проведен анализ энергетических параметров электродвигателя в программном комплексе СПРУТ-АЭД, предназначенном для расчета трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

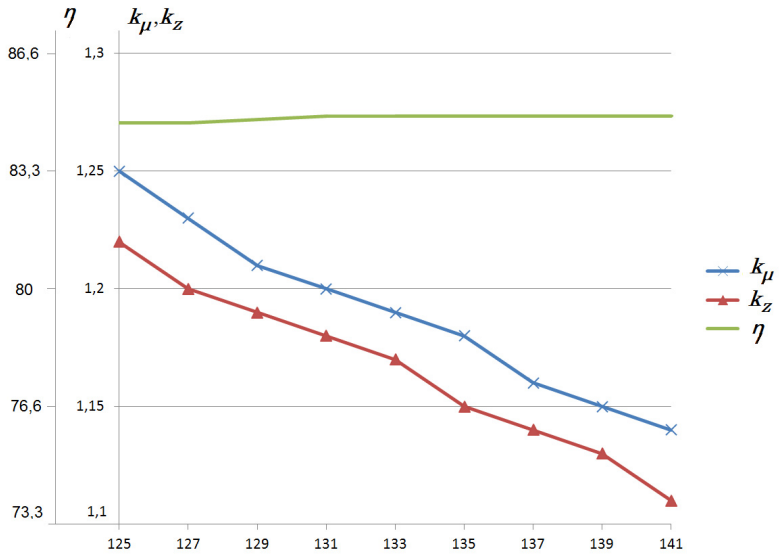
Исследована зависимость КПД, коэффициента насыщения зубцовой зоны k_z, коэффициента насыщения магнитной цепи k_{μ} при изменении длины воздушного зазора в пределах $l_{\delta 2} \pm 6$ %. Это позволило определить оптимальные массогабаритные размеры проектируемого электродвигателя. Данные расчетов приведены в таблице.

Значение коэффициента насыщения зубцовой зоны k_z позволяет оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины [3]. При высоком значении k_z зубцовая зона чрезмерно насыщена, при малом – недоиспользована или воздушный зазор взят слишком большим. Оптимальным считается $k_z = 1{,}2–1{,}25$. Уменьшение длины воздушного зазора приводит к снижению магнитного напряжения воздушного зазора F_δ и увеличению насыщения магнитной цепи машины.

Энергетические показатели электродвигателя для различной длины воздушного зазора

l_δ, мм	125	127	129	131	133	135	137	139	141
η, %	84,7	84,7	84,8	84,9	84,9	84,9	84,9	84,9	84,9
k_μ	1,25	1,23	1,21	1,20	1,19	1,18	1,16	1,15	1,14
k_z	1,22	1,20	1,19	1,18	1,17	1,15	1,14	1,13	1,11

По данным таблицы построены зависимости КПД и коэффициентов насыщения от длины воздушного зазора.



Зависимость коэффициентов насыщения от длины воздушного зазора

Результаты

Как видно из графиков, КПД не зависит от длины машины, в то время как значения коэффициентов k_μ и k_z снижаются с увеличением длины воздушного зазора.

Теоретически значения коэффициентов k_z и k_μ должны лежать в пределах 1,2–1,25. Проведенный расчет показывает, что эти значения достигаются при $l_{\delta 2} = 128$ мм.

Вывод

На базе тягового двигателя АДТ-6с спроектирован двигатель меньшей мощности путем уменьшения длины воздушного зазора с параметрами: $U = 48$ В, $P = 5$ кВт, $n = 1500$ об/мин. Точное значение длины воздушного зазора вычислено в ходе оптимизации параметров магнитной системы.

Список литературы

1. *Копылов, И. П.* Проектирование электрических машин : учеб. для вузов / Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев ; под ред. И. П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2002. – 757 с.

2. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, Бухалфа Бендахман, А. М. Якимец, О. В. Каленик // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 21–23.

3. *Стародубцева, В. А.* Расчет и проектирование электрических машин. Асинхронные машины : учеб. пособие для вузов. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 352 с.

I. D. Rodionov, magister student
A. V. Morozov, senior lecturer
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Design of the Electric Motor of the Hinged Equipment of the Unified Machine of Technological Electrotransport

The purpose of this work is the design of an electric motor for the unified machine of technological electrotransport based on the existing engine ADT-6c. In work the questions of optimization of mass and size indicators.

Keywords: asynchronous motor, frequency control, optimization, saturation, SPRUT-AED.

УДК 621.31(045)

В. А. Стародубцева, канд. техн. наук, доц.
А. С. Мазитов, магистрант
E-mail: sudar.s@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Поиск путей решения проблем, связанных с учетом и распределением электрической энергии

В данной статье рассмотрен новый вид технологии распределенной базы данных – технология Blockchain, которую можно применить в электроэнергетике. Оценены ее достоинства и недостатки. Описан принцип работы технологии. Приведены основания для использования технологии Blockchain в электроэнергетике.

Ключевые слова: блокчейн, распределенная база данных, электроэнергетика, альтернативная энергетика, новые технологии, умные электрические сети.

Введение

Во всей отрасли электроэнергетики при решении теоретических и практических задач возникает множество проблем глобального характера, особенно с учетом масштабности российских электрических сетей. Эти проблемы, в частности, появляются на этапах проектирования и моделирования потребления, генерации, накопления, распределения и при оценке фактического потребления электрической энергии.

Согласно Указу Президента РФ от 15 июня 2012 г. № 859 «О стратегии развития топливно-энергетического комплекса и экологической безопасности», одной из приоритетных задач в электроэнергетике является разработка, внедрение и развитие программ по перспективным современным технологиям [1].

Указом определены и остаются актуальными по сей день ключевые направления развития электроэнергетики: введение нового формата электроэнергетики, более эффективное использование действующих активов и оборудования, применение улучающих технологий [2].

Решения требуют проблемы, связанные с учетом и распределением энергии, которые можно разрешить посредством применения новых

© Стародубцева В. А., Мазитов А. С., 2018

сервисов в энергетике, основанных на технологии распределенного реестра – ***технологии Blockchain***.

Blockchain – выстроенная по определенным правилам непрерывная последовательная цепочка блоков, содержащих информацию. Чаще всего копии цепочек блоков хранятся и обрабатываются на множестве разных компьютеров [3].

Технология Blockchain – это технология надежного распределенного хранения достоверных записей определенных параметров, собранных в системе электроэнергетики. Эта технология обеспечивает фиксирование информации и её защиту от подмены и подделки.

Принцип работы технологии Blockchain

Blockchain – это цепочка блоков данных, где каждый блок связан с предыдущим. Блок содержит в себе набор записей. А новые блоки всегда добавляются строго в конец цепочки.



Рис. 1. Цепочка блоков данных в Blockchain

Данная цепочка является весьма непростой, она построена на трех основных принципах:

1. Распределенность.
2. Открытость.
3. Защищенность.

Все пользователи Blockchain образуют собой сеть компьютеров, на каждом из которых хранится копия всех данных структуры Blockchain или часть данных, нужных лишь для конкретного компьютера.

Благодаря этому разрушить Blockchain практически невозможно, поскольку для этого надо выключить или сломать все компьютеры. Пока есть хоть один пользователь, Blockchain существует. Каждый новый пользователь расширяет и укрепляет эту сеть. Причем все компьютеры равноправны, там нет организаторов, модераторов, контролеров и менеджеров. Каждый отвечает за себя сам.

Все данные Blockchain – блоки и их содержимое – открыты всегда и для всех. Легко можно прочитать любой блок и увидеть все записи в этом блоке. Можно посмотреть цепочку и отследить изменение ин-

формации. Таким образом, все данные в Blockchain легко проверяемы, но они не могут быть изменены другим пользователем сети без специального ключа доступа.

Для защиты данных пользователей в Blockchain широко используется шифрование. Благодаря этому одновременно можно получить казалось бы несовместимое – открытость и достоверность при полном исключении недоверия и, возможно, даже злонамеренного умысла.

Сеть узлов Blockchain

Структура Blockchain представляет собой объединение всех узлов сети. Узел (нода) – компьютер, подключенный к сети Blockchain с помощью клиента, который выполняет задачу проверки и передачи транзакций, а также получает копию, которая загружается автоматически при присоединении к Blockchain-сети.

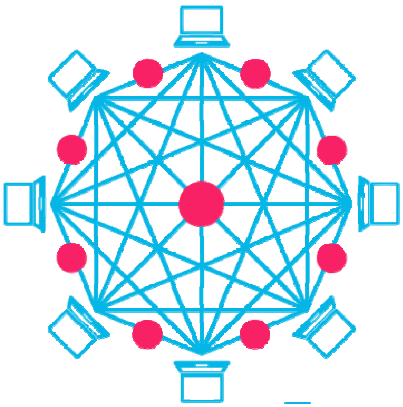


Рис. 2. Узел Blockchain-сети

Вместе эти узлы создают мощную сеть, сеть более высокого уровня. Это совершенно иное видение того, как может функционировать компьютерная сеть.

Обычные распределительные компьютерные сети имеют централизованную структуру, а сети Blockchain – децентрализованную, где каждый узел является «администратором» и присоединяется к сети добровольно.

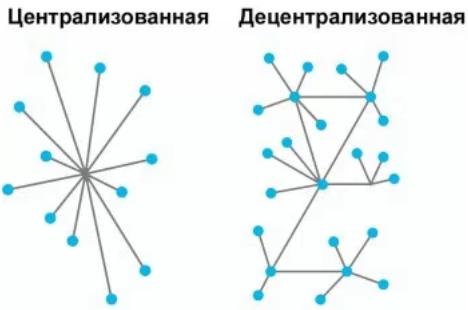


Рис. 3. Децентрализованная структура сети Blockchain

Технологии Blockchain обладают как достоинствами, так и недостатками.

Достоинства:

1. Экономическая эффективность.
2. Прозрачность работы сети.
3. Безопасность для базы данных.
4. Защита от коррупции.
5. Возможность создать в Blockchain-сети отраслевой альянс, подключив к нему поставщиков электроэнергии, распределительные сети, партнеров и конкурентов.

Недостатки:

1. Производительность Blockchain-систем ниже, чем уже развитых на данном этапе высоконагруженных систем, что объясняется новизной технологии и малоизученностью проблемы
2. Отсутствие высококвалифицированных специалистов в области технологии Blockchain на данном этапе ее развития.
3. Значительные инвестиции для развития инфраструктуры Blockchain.
4. Для поддержания функционирования системы нужен значительный штат собственных специалистов, обслуживающих отраслевые сети Blockchain.

Предпосылки использования Blockchain в электроэнергетике

Электроэнергия, полученная от альтернативных и возобновляемых источников энергии, например, генерируемая солнцем или ветром, физически ничем не отличается от той, что производится в результате применения традиционных источников энергии, например, сжигания угля, мазута или газа. Альтернативная энергия считается «чистой»

электроэнергией, в отличие от энергии, полученной традиционным путем. Проблемой для поставщиков, производителей и профильных инвесторов является невозможность отследить долю поступающей энергии, полученной различными способами. Это делает инвестиции в альтернативную энергетику недостаточно прозрачными и тормозит ее развитие [4].

Blockchain станет основой для электросетей будущего, потому что позволит отслеживать оборот электроэнергии. В индустриях, где потребители и поставщики образуют связанную сеть, Blockchain оказывается максимально эффективным, как доказывают ученые. Более того, такая сеть эволюционирует, и в какой-то момент потребители сами смогут стать поставщиками.

Вывод

Blockchain приходит в энергетику со своим стандартным набором сильных сторон: распределенностью баз данных одновременно с открытостью и защищенностью; невозможностью внесения изменений в базы данных; прозрачностью работы сети. Именно эти составляющие отсутствуют на современном энергетическом рынке. На пути от производителя до поставщика с энергией, а точнее с сертификатом, который является ее документальным эквивалентом, может произойти масса манипуляций, в том числе и мошеннических. Эта система сегодня малопрозрачна и малоконтролируема, несмотря на наличие огромного числа измерительной аппаратуры. Данные счетчиков можно подделать, в том числе и на оптовом рынке электроэнергии. Если же, начиная с этапа производства электроэнергии, позволить результаты измерительной аппаратуре вносить в Blockchain, то множество проблем исчезнет. Данные не получится фальсифицировать многочисленным посредникам и платить придется только за то, что было произведено.

Меняются и сами электросети. В распределенной сети соседи смогут обеспечивать друг друга энергией, покупать ее друг у друга, а излишки возвращать в более крупные городские сети. Но для всего этого нужен контроль и учет. Blockchain может дать это и одновременно подтолкнуть развитие альтернативной энергетики.

Список литературы

1. О Комиссии при Президенте Российской Федерации по вопросам стратегии развития топливно-энергетического комплекса и экологической безо-

пасности : Указ Президента РФ от 15 июня 2012 г. № 859 (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] // Информационно-правовое обеспечение «Гарант». – URL: http://base.garant.ru/70189914/ (дата обращения: 18.10.2017).

2. *Окашин, Р.* Как блокчейн может создать «умную» и «чистую» электросеть [Электронный ресурс] // Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. – URL: https://nangs.org/news/technologies/kak-blokchejn-mozhet-sozdat-umnuyu-i-chistuyu-elektroset/ (дата обращения: 18.10.2017).

3. Блокчейн [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Блокчейн (дата обращения: 18.10.2017).

4. *Franco, P.* Understanding Bitcoin: Cryptography, Engineering and Economics. – John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2014. – 288 p.

5. *Antonopoulos, A. M.* Mastering Bitcoin: Programming the Open Blockchain. – O'Reilly Media, Inc. – Sebastopol, 2017. – 408 p.

6. *Tapscott, D.* Blockchain Revolution / D. Tapscott and A. Tapscott. – Javitz Centre, New York, USA, 2016. – 56 p.

7. *Свэн, М.* Блокчейн. Технология, которая изменит мир. – М. : Олимп-Бизнес, 2015. – 142 с.

8. *Могаяр, У.* Блокчейн. Перспективы, практика и применение технологии следующего поколения. – М. : Эксмо, 2016. – 224 с.

V. A. Starodubtseva, CSc in engineering, associate professor
A. S. Mazitov, magister student
E-mail: sudar.s@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Search for Solutions to Problems Related to the Accounting and Distribution of Electric Energy

This article describes a new kind of technology distributed database – the Blockchain technology that can be applied in the electric power industry. Evaluated its strengths and weaknesses. The principle of operation of technology. The reasons for the use of Blockchain technology in the electric power industry.

Keywords: blockchain, a distributed database, power generation, alternative energy, new technologies, smart electric network.

УДК 621.383.93

Ю. К. Шелковников, д-р техн. наук, проф., глав. науч. сотрудник
E-mail: yushelk@mail.ru
С. Р. Кизнерцев, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник
E-mail: iit@udman.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
А. А. Метелева, студент
E-mail: meteleva-nami@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Информационно-измерительные системы с дифференциальным вариантом включения сканистора для изучения динамики быстропротекающих процессов

Рассмотрены вопросы увеличения быстродействия, повышения качества обработки и регистрации информации при изучении динамики быстропротекающих процессов. Показана целесообразность применения для этой цели дифференциального амплитудного режима включения сканистора. Описана сканисторная информационно-измерительная система на основе этого режима, определена погрешность от нелинейности ее выходной характеристики.

Ключевые слова: сканисторная информационно-измерительная система, дифференциальный вариант включения, световая зона, видеосигнал.

Введение

При исследовании динамики различных быстропротекающих процессов [1–6] довольно часто встречаются задачи, где применение телевизионных сканисторных структур (сплошного сканистора, дискретного мультискана) во времяимпульсном режиме работы [7–13] является затруднительным ввиду невысокого быстродействия обработки видеоинформации, сложности электронных блоков и недостаточной наглядности способа регистрации контролируемых параметров. Подобные задачи встречаются, например, при исследовании деформаций протяженных конструкций, в физико-химическом анализе для измерения распределения коэффициента преломления вдоль реакционной камеры и т. д. [14, 15]. Для решения таких задач целесооб-

© Шелковников Ю. К., Кизнерцев С. Р., Метелева А. А., 2018

разно использовать дифференциальный амплитудный режим работы сканистора, особенно эффективный при необходимости за время одного опроса сканистора выделить, обработать и представить информацию о перемещениях *n*-го числа световых зон, при этом величина каждого перемещения не должна превышать ширины соответствующей зоны.

Информационно-измерительная система с дифференциальным амплитудным режимом работы сканистора на основе дифференцирующего трансформатора

На рис. 1 приведена структурная схема сканисторной информационно-измерительной системы (СИИС) с дифференциальным

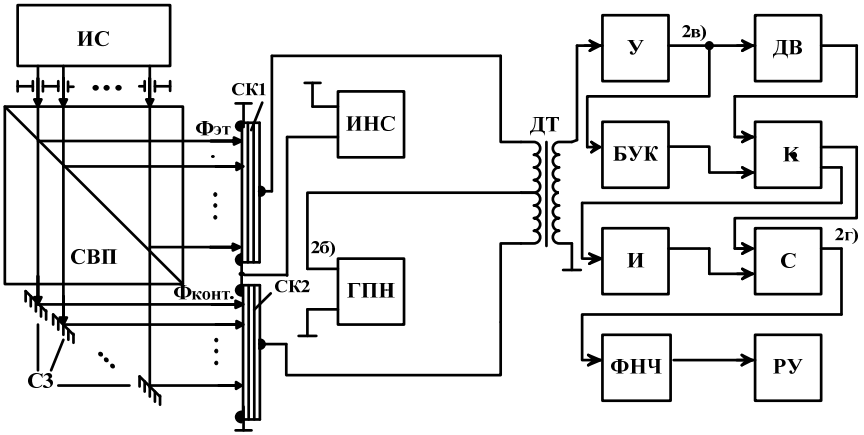


Рис. 1. Структурная схема СИИС с дифференциальным амплитудным режимом работы сканисторов для исследования динамики быстропротекающих процессов

амплитудным включением двух сканисторов с одинаковыми параметрами для исследования динамики быстропротекающих процессов (где СК1, СК2 – сканисторы; ИНС – источник напряжения смещения; ГПН – генератор пилообразного напряжения; ИС – источник света; СВП – светоделительная призма; СЗ – система зеркал; $\Phi_{конт}$, $\Phi_{эт}$ – контролируемая и эталонная последовательности световых зон; ДТ – дифференцирующий трансформатор; У – усилитель; ДВ – фазочувствительный выпрямитель разностного сигнала на основе двухполупериодного выпрямителя; БУК – блок управления коммутатором; К – коммутатор; И – инвертор; С – сумматор; ФНЧ – фильтр нижних частот; РУ – ре-

гистрирующее устройство). СИИС работает следующим образом. Дискретный световой поток от источника света ИС проецируется через выходную грань светоделительной призмы СВП на первый сканистор СК1 для формирования на нем эталонной последовательности Фэт световых зон, а через другую выходную грань СВП и систему СЗ зеркал, закрепленных в контролируемых точках объекта – на второй сканистор СК2 для формирования на нем контролируемой последовательности $\Phi_{конт}$ световых зон, соответствующей в любой текущий момент времени реальному распределению параметров протяженного объекта При опросе сканисторов СК1, СК2 от генератора ГПН пилообразного напряжения на выходе суммирующей обмотки дифференцирующего трансформатора ДТ выделяется сигнал Vp, равный разности сигналов (рис. 2) от эталонного $\Phi_{эт}$ и контролируемого $\Phi_{конт}$ дискретных световых потоков. В исходном состоянии, при временном сдвиге между видеосигналами, равном нулю, разностный сигнал отсутствует; при увеличении смещения контролируемого потока относительно эталонного разностный сигнал растет с соответствующим изменением полярности при смене направления смещения; при перемещении светового потока на величину, большую ширины световой зоны, разностный сигнал вырождается в два отдельных видеосигнала с двух сканисторов. В данном случае дифференцирующий трансформатор сочетает в себе функции преобразователя время – амплитуда и устройства для выделения и вычитания видеосигналов. На рис. 2 приведены временные диаграммы, поясняющие принцип работы СИИС.

Для выделения огибающей дискретного распределения величин перемещений для различных точек по длине протяженного объекта служат: усилитель У; фазочувствительный выпрямитель разностного сигнала на основе двухполупериодного выпрямителя ДВ, блока БУК управления коммутатором, коммутатора К разностного сигнала, инвертора И, сумматора С; фильтр ФНЧ нижних частот; регистрирующее устройство РУ. Выделяемая огибающая, характеризующая динамику контролируемого процесса, может наблюдаться на экране осциллографа, а также после соответствующего аналого-цифрового преобразования записываться или обрабатываться в микропроцессоре по соответствующей программе. Достоинствами СИИС являются высокое быстродействие, простота и надежность. К недостаткам следует отнести неполную компенсацию разностного сигнала из-за неидентичности сканисторов и требования значительной освещенности световых зон.

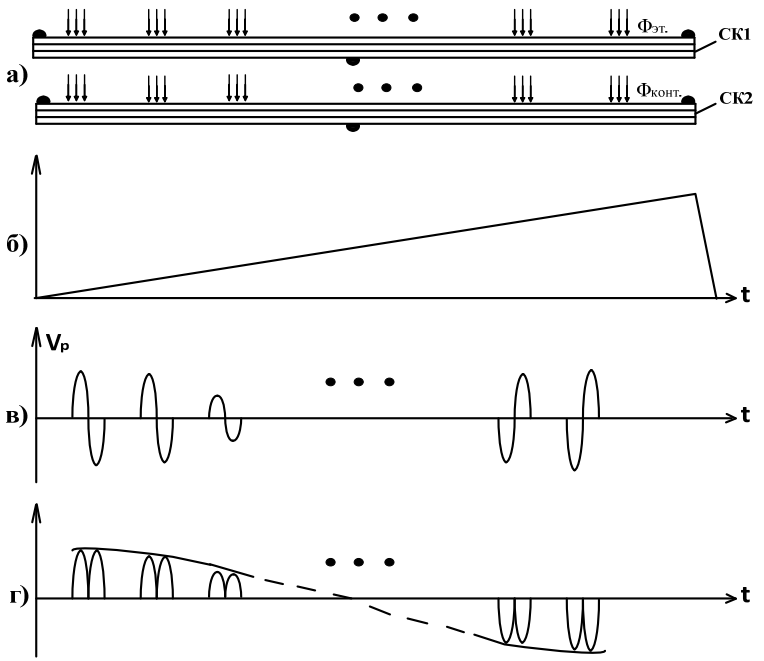


Рис. 2. Выделение огибающей дискретного распределения величин перемещений для различных точек по длине протяженного объекта

Информационно-измерительная система с модуляцией светового потока и дифференциальным амплитудным режимом работы сканистора

Полная компенсация разностного видеосигнала и возможность работы со слабыми световыми потоками реализуется в структурной схеме ИИС (рис. 3, 4) на основе одного сканистора с применением модуляции яркости светового потока (где СК – сканистор; ИНС – источник напряжения смещения; ГПН – генератор пилообразного напряжения; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ИС1, ИС2 – источники света; СЗ – система зеркал; $\Phi_{конт}$, $\Phi_{эт}$ – контролируемая и эталонная последовательности световых зон; СПТН1, СПТН2 – селективные преобразователи ток – напряжение; СД1, СД2 – синхронные детекторы; ФНЧ1, ФНЧ2 – фильтры нижних частот; ДУ1, ДУ2 – дифференцирующие устройства; ВУ – вычитающее устройство; ПРУ – преобразовательно-регистрирующее устройство). Здесь для формирования разностного сигнала используется один сканистор СК, а эталонный $\Phi_{эт}$ и контролируемый $\Phi_{конт}$ дискретные световые потоки про-

ецируются соответственно в одни и те же точки фоточувствительной поверхности сканистора СК, подключенного к схеме опроса на базе генератора ГПН пилообразного напряжения и источника ИНС напряжения смещения. Последовательности дискретных эталонных и рабочих видеосигналов, выделенные в раздельные каналы на основе селективных преобразователей СПТН1, СПТН2 ток – напряжение, синхронных детекторов СД1, СД2, генератора ГТИ тактовых импульсов, фильтров ФНЧ1, ФНЧ2 нижних частот, дифференцирующих устройств ДУ1, ДУ2, суммируются в противофазе вычитающим устройством ВУ; сформированный разностный сигнал Vp (рис. 2, *б*) подается на преобразовательно-регистрирующее устройство ПРУ с встроенным (по схеме рис. 1) фазочувствительным выпрямителем.

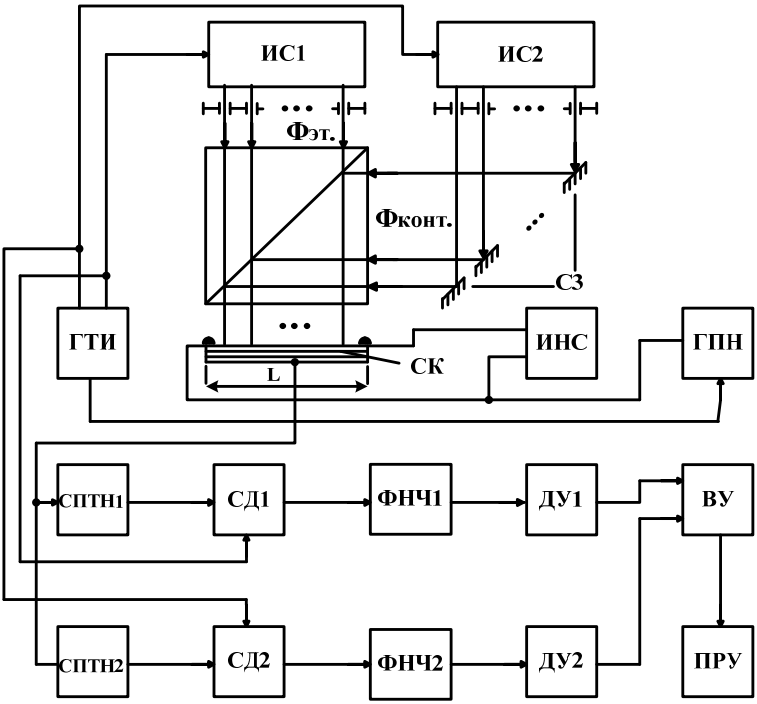
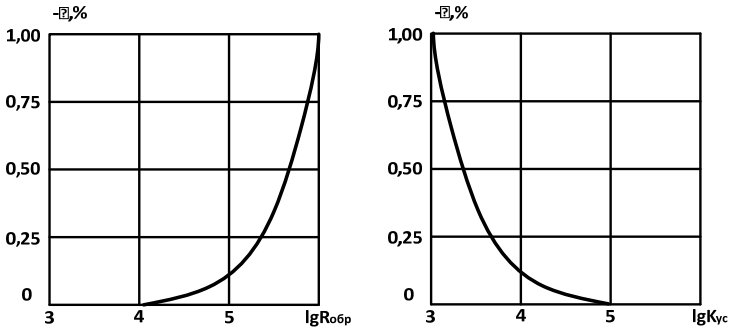


Рис. 3. Структурная схема СИИС с модуляцией светового потока и дифференциальным амплитудным режимом работы сканистора



а *б*

Рис. 4. Зависимость разностного сигнала от величины смещения контролируемого и эталонного световых потоков относительно друг друга: *а* – выходная характеристика для разностного сигнала; *б* – отклонения выходной характеристики от линейной зависимости

Заключение

Выходная характеристика (т. е. зависимость разностного сигнала от величины смещения световых потоков относительно друг друга для световой зоны шириной 0,01L) представлена на рис. 4, *а*. Характеристика имеет две области установившихся значений, где амплитуда разностного сигнала не меняется и равна амплитуде одного из видеосигналов. На среднем рабочем участке выходная характеристика линейна. Ее отклонения от линейной зависимости на участке, соответствующем половине амплитуды установившихся значений, показаны на рис. 4, *б*. Можно отметить, что для данного варианта включения сканистора погрешность от нелинейности при работе на этом участке не превышает 6 %. Длина участка определяется шириной световой зоны на сканисторе.

Список литературы

1. *Подласкин, Б. Г.* Позиционно-чувствительный фотодетектор – мультискан / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук // Измерительная техника. – 2005. – № 8. – С. 31–34.

2. Опыт создания контрольно-измерительных устройств на основе позиционно-чувствительного датчика «мультискан» / А. Г. Обеленсков, С. М. Латыев, С. С. Митрофанов, Б. Г. Подласкин // Оптический журнал. – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 57–61.

3. Построение синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан / Б. Г. Подласкин, А. В. Васильев, Е. Г. Гук, Н. А. Токранова // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – № 10. – С. 110–116.

4. Помехозащищенный сканисторный измеритель угловых перемещений объектов / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, А. В. Алиев, Н. И. Осипов // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. – № 2. – С. 106–112.

5. *Липанов, А. М.* Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников // Известия РАРАН. – 2005. – № 2. – С. 71–75.

6. *Шелковников, Ю. К.* Сканисторная информационно-измерительная система с адаптивным режимом сканирования // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 169–172.

7. Подавление влияния мощной фоновой засветки на точность координатоуказания оптического сигнала / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук, А. Г. Обеленсков, А. А. Сухарев // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 9. – С. 128–131.

8. *Подласкин, Б. Г.* Анализ компенсации искажений оптических сигналов с помощью позиционно-чувствительного фотоприемника мультискан методом формирования квазимедианы / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77, № 2. – С. 95–98.

9. Координатно-чувствительный датчик мультискан : пат. 2399117 Рос. Федерация / Гук Е. Г., Подласкин Б. Г. – Опубл. 22.09.2009.

10. Датчик координат стрелкового тренажера : пат. 2151361 Рос. Федерация / Шелковников Ю. К., Веркиенко А. Ю., Осипов Н. И., Подласкин Б. Г. – Опубл. 02.08.1999.

11. *Липанов, А. М.* Применение дискретно-сплошной структуры мультискана в оптико-электронных измерительных устройствах / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 46–49.

12. *Шелковников, Ю. К.* Повышение стабильности координатной характеристики информационно-измерительных систем с времяимпульсным режимом работы телевизионного сканистора / Ю. К. Шелковников, А. А. Метелева // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : ИжГТУ, 2017. – С. 324–330.

13. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров / С. Ф. Егоров, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев, А. А. Метелева // Проблемы механики и материаловедения : тр. ИМ УрО РАН. – Ижевск, 2017. – С. 227–248.

14. *Шелковников, Ю. К.* Рефрактометр / Ю. К. Шелковников, П. И. Госьков // Измерительная техника. – 1976. – № 4. – С. 50–53.

15. *Липанов, А. М.* Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 133 с.

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in engineering, prof., chief researcher
E-mail: yushelk@mail.ru
S. R. Kiznertsev, CSc in engineering, senior researcher
E-mail: iit@udman.ru
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia
A. A. Meteleva, student
E-mail: meteleva-nami@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Information-Measuring Systems with a Differential Version of the Inclusion of a Scanistor for Studying the Dynamics of Fast Processes

The problems of increasing the speed, improving the quality of processing and recording information in studying the dynamics of fast processes are considered. The expediency of using the differential amplitude mode of the scanistor inclusion for this purpose is shown. A scanistor information-measuring system based on this mode is described, the error is determined from the nonlinearity of its output characteristics.

Keywords: scanistor information-measuring system, differential switching mode, light zone, video signal.

УДК 621.383.93

Ю. К. Шелковников, д-р техн. наук, проф., глав. науч. сотрудник
E-mail: yushelk@mail.ru
Н. И. Осипов, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник
E-mail: iit@udman.ru
К. С. Ермолин, мл. науч. сотрудник
E-mail: ermolin@udm.ru
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
А. А. Метелева, студент
E-mail: meteleva-nami@rambler.ru
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Применение фотопотенциометрического варианта включения сканистора в задачах автоматического контроля за пространственно-временным состоянием объекта

Рассмотрены вопросы уменьшения динамической погрешности при контроле координат, скоростей и ускорений быстроперемещающихся объектов. Описаны принципы построения информационно-измерительных систем на основе фотопотенциометрического режима включения сканистора. По-

© Шелковников Ю. К., Осипов Н. И., Ермолин К. С., Метелева А. А., 2018

казано, что фотопотенциометрический режим работы позволяет существенно увеличить быстродействие измерений по сравнению с времяимпульсным режимом и осуществлять непрерывный контроль за изменением местоположения объекта.

Ключевые слова: сканисторная информационно-измерительная система, фотопотенциометрический вариант включения, световая зона, видеосигнал

Введение

Телевизионные сканисторные структуры (сплошной сканистор, дискретный мультискан) используются в технике двойного применения для измерения угловых и линейных перемещений, скоростей, ускорений, размеров и взаимного расположения объектов [1–6]. Следует отметить, что при анализе динамики быстропротекающих процессов [7, 8] весьма часто возникает необходимость определения местоположения и освещенности одиночных световых зон, перемещающихся по фоточувствительной поверхности структуры со скоростями до 100 м/сек, или величин их смещений, скоростей и ускорений. Использование для этой цели времяимпульсного режима работы [9–14] приводит к динамической погрешности, если для измерения местоположения световой зоны используется временной интервал от характерной точки видеосигнала до момента окончания опроса сканистора, т. к. к концу опроса измеренное значение координаты уже не будет соответствовать ее текущему действительному значению. Для устранения рассмотренной динамической погрешности можно использовать временной интервал от начала опроса сканистора до характерной точки видеосигнала с выдачей результата измерений в момент опроса этой точки. Однако это приводит к неравномерному квантованию во времени траектории движения световой зоны и сложности аппаратной реализации цифрового дифференцирования.

Фотопотенциометрический вариант включения сплошного сканистора в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя

Для решения задач анализа быстропротекающих процессов целесообразно использовать фотопотенциометрический вариант включения сканистора, обладающий более высоким быстродействием, разрешением по координате, простотой электронной схемы. Представление для этого варианта включения выходного сигнала со сканистора в аналоговой форме позволяет с помощью прецизионных ана-

логовых дифференциаторов просто и точно определять скорость и ускорение контролируемого объекта, а в сочетании с аналого-цифровым преобразованием видеоинформации со сканистора использовать рациональные цифровые методы ее обработки. На рис. 1 приведена схема фотопотенциометрического варианта включения сканистора (где СК – сканистор; ЗГ – задающий генератор; ОУ – операционный усилитель; ВУ – вычитающее устройство; РУ1, РУ2 – устройства для регистрации перемещений и освещенности световой зоны соответственно).

Для приведенной схемы при коэффициенте $k \to \infty$ операционного усилителя (ОУ) для случая освещенных фотодиодов Д5, Д6 можно записать:

$$U_{вых1} = -U_{вх} \cdot \left(R_1 + R_2 \right) / R_{вх}; \tag{1}$$

$$U_{вых2} = -U_{вх} \cdot \left(R_1 + R_2 + R_{пр} + R_{обр} \right) / R_{вх}; \tag{2}$$

$$U_{вых3} = U_{вых2} - U_{вых1} = -U_{вх} \cdot \left(R_{пр} + R_{обр} \right) / R_{вх}, \tag{3}$$

где $R_{пр} = R_{пр5} = R_{пр6}$; $R_{обр} = R_{обр5} = R_{обр6}$ – соответственно прямые и обратные сопротивления фотодиодов 5, 6.

При перемещении световой зоны на величину Δx

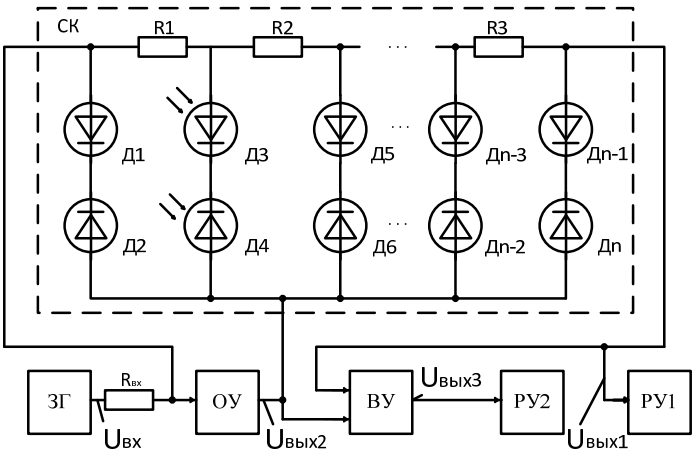


Рис. 1. Схема фотопотенциометрического варианта включения сплошного сканистора в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя

$$\Delta U_{\text{вых1}} = -U_{\text{вх}} \cdot \Delta R_{\text{дел}} / R_{\text{вх}} = K_1 \cdot \Delta x, \quad (4)$$

где $\Delta R_{\text{дел}}$ – сопротивление делительного слоя сканистора на участке Δx; K_1 – коэффициент, определяемый конкретными величинами $U_{\text{вх}}$, $R_{\text{вх}}$ и погонного сопротивления делительного слоя.

При изменении освещенности световой зоны, соответствующем изменению $\Delta R_{\text{обр}}$, и при условии $R_{\text{обр}} >> R_{\text{пр}}$

$$\Delta U_{\text{вых3}} = -U_{\text{вх}} \cdot \Delta R_{\text{обр}} / R_{\text{вх}} = K_2 \cdot \Delta R_{\text{обр}}, \quad (5)$$

где K_2 – коэффициент, определяемый конкретными величинами $U_{\text{вх}}$, $R_{\text{вх}}$ и фоточувствительностью сканисторной структуры.

Из (4) следует, что $\Delta U_{\text{вых1}}$, регистрируемое РУ1, не зависит от интенсивности светового потока, а зависит только от его перемещения (координаты), причем выходная характеристика $\Delta U_{\text{вых1}} = f(x)$ является линейной по всей длине сканистора. Линейность характеристики определяется линейностью распределения сопротивления вдоль делительного слоя сканистора, которая, в свою очередь, определяется технологией его изготовления. На рис. 2 приведены зависимости ошибки определения координат световых потоков от коэффициента усиления ОУ и обратного сопротивления фотодиодов сканисторной структуры при $R_{\text{дел}} = R_{\text{вх}} = 10^4$ Ом; $\Delta R_{\text{дел}} = 5 \cdot 10^5$ Ом; $K = 10^4$; $R_{\text{обр}} = 10^5$ Ом.

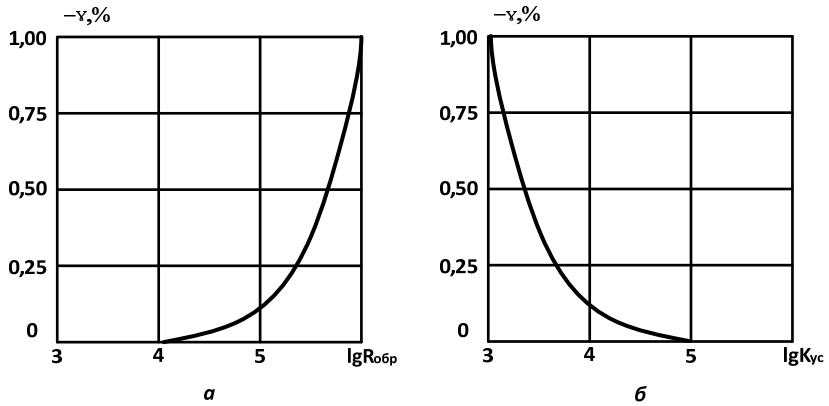


Рис. 2. Ошибки определения местоположения светового потока в зависимости: *а* – от коэффициента усиления усилителя; *б* – от обратного сопротивления фотодиодов

Рассмотренный фотопотенциометрический вариант включения сканистора может служить основой для создания устройств, где требуется одновременно определять местоположение и освещенность световой зоны, например, рефрактометров-колориметров, позволяющих одновременно из одной пробы вещества по одному лучу определять его коэффициент преломления и оптическую плотность. В работе [7] описано применение фотопотенциометрического режима работы сканистора для измерения параметров вибраций объектов, при этом для повышения прочности фотоприемника и надежности электрических соединений разработана специальная вибропрочная конструкция сканистора. Схема включения сканистора в фотопотенциометрическом следящем режиме также может быть использована для совмещения координатных осей измерительных датчиков в гибридном акустическом микроскопе [15].

Недостатком фотопотенциометрического режима работы с включением сканистора в цепь отрицательной обратной связи ОУ является ограниченный диапазон освещенностей световой зоны, т. к. в рассматриваемой схеме (рис. 1) ток входной цепи и цепи отрицательной обратной связи стабилизируется ОУ, но на стабилизацию накладывают ограничения токостабилизирующие свойства фотодиодных ячеек сканистора.

Включение дискретной телевизионной сканисторной структуры – мультискана в фотопотенциометрическом следящем режиме

Фотопотенциометрический следящий режим используется для определения координат центра одиночного светового пятна. Схема такого фотопотенциометра на основе мультискана приведена на рис. 3 (где М – мультискан; x – координата контролируемого светового потока Ф; E_0 – источник напряжения смещения; C – конденсатор; ОУ – операционный усилитель).

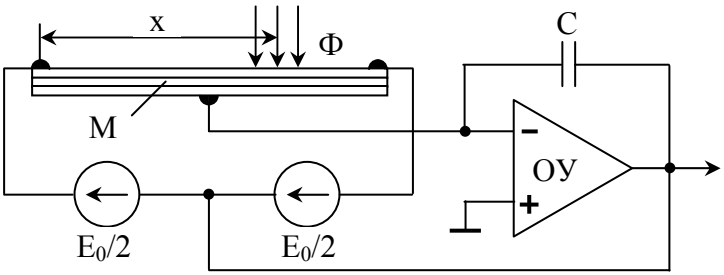


Рис. 3. Схема включения дискретного мультискана в фотопотенциометрическом следящем режиме

В этой схеме на вход интегратора на основе ОУ подается ток $\Delta I(x_i)$, представляющий собой разность фототоков, собранных с фотодиодов по обеим сторонам от положения на мультискане нулевой эквипотенциали:

$$\Delta I(x_i) = k_1 \int_0^{x_i} \Phi^{III}(x) \cdot dx - k_2 \int_{x_i}^{L} \left[\Phi^{I}(x) + \Phi^{II}(x) \right] \cdot dx . \qquad (6)$$

По мере заряда конденсатора С выходное напряжение интегратора изменяет положение нулевой эквипотенциали до момента равенства фототоков по обе ее стороны, после этого заряд конденсатора С прекращается. Установившееся напряжение заряда u_x равно:

$$u_x = \frac{1}{C} \cdot \int_0^{t_k} \left[k_1 \int_0^{x_i} \Phi^{III}(x) \cdot dx - k_2 \int_{x_i}^{L} \left[\Phi^{I}(x) + \Phi^{II}(x) \right] \cdot dx \right] \cdot dt , \qquad (7)$$

где C – емкость конденсатора интегратора; t_k – момент окончания заряда, соответствующий $\Delta I(x_i) = 0$ при $x_i = x_c$; x_c – координата весового центра светового пятна; k_1, k_2 – коэффициенты преобразования, отражающие фоточувствительность диодов средней линейки и коммутационных диодов мультискана. При этом напряжение u_x определяет координату x_c светового пятна относительно середины фоточувствительной поверхности:

$$x_c = \frac{u_x}{2 \cdot E_0} \cdot L . \qquad (8)$$

Заключение

Недостатком следящего режима является чувствительность к размерам и форме светового пятна, поэтому необходимо формировать световой сигнал в виде узкого штриха, перпендикулярного продольной оси мультискана. Следует отметить, что схема включения мультискана в фотопотенциометрическом следящем режиме также может быть использована для совмещения координатных осей измерительных датчиков в гибридном акустическом микроскопе [15].

Список литературы

16. *Липанов, А. М.* Использование телевизионного сканистора в технике двойного применения / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников // Известия РАРАН. – 2005. – № 2. – С. 71–75.

17. *Липанов, А. М.* Применение дискретно-сплошной структуры мультискана в оптико-электронных измерительных устройствах / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 46–49.

18. Исследование оптико-электронных регистраторов точки прицеливания стрелковых тренажеров / С. Ф. Егоров, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, С. Р. Кизнерцев, А. А. Метелева // Проблемы механики и материаловедения : тр. ИМ УрО РАН. – Ижевск, 2017. – С. 227–248.

19. *Подласкин, Б. Г.* Позиционно-чувствительный фотодетектор – мультискан / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук // Измерительная техника. – 2005. – № 8. – С. 31–34.

20. Опыт создания контрольно-измерительных устройств на основе позиционно-чувствительного датчика «мультискан» / А. Г. Обеленсков, С. М. Латыев, С. С. Митрофанов, Б. Г. Подласкин // Оптический журнал. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 57–61.

21. Построение синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан / Б. Г. Подласкин, А. В. Васильев, Е. Г. Гук, Н. А. Токранова // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – № 10. – С. 110–116.

22. Помехозащищенный сканисторный измеритель угловых перемещений объектов / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, А. В. Алиев, Н. И. Осипов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2. – С. 106–112.

23. *Липанов, А. М.* Анализ работы мультискана с амплитудно-модулированными световыми потоками / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов // Датчики и системы. – 2003. – № 10. – С. 12–16.

24. Координатно-чувствительный датчик мультискан : пат. 2399117 Рос. Федерация / Гук Е. Г., Подласкин Б. Г. – Опубл. 22.09.2009.

25. Подавление влияния мощной фоновой засветки на точность координатоуказания оптического сигнала / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук, А. Г. Обеленсков, А. А. Сухарев // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – № 9. – С. 128–131.

26. *Подласкин, Б. Г.* Построение двойной синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан для определения положения фронта перепада яркости слабоконтрастных оптических сигналов / Б. Г. Подласкин, Е. Г. Гук, Е. В. Носенко // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 6. – С. 73–78.

27. Датчик координат стрелкового тренажера : пат. 2151361 Рос. Федерация / Шелковников Ю. К., Веркиенко А. Ю., Осипов Н. И., Подласкин Б. Г. – Опубл. 02.08.1999.

28. *Липанов, А. М.* Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур / А. М. Липанов, Ю. К. Шелковников. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 133 с.

29. *Шелковников, Ю. К.* Повышение стабильности координатной характеристики информационно-измерительных систем с время-импульсным режимом работы телевизионного сканистора / Ю. К. Шелковников, А. А. Метелева // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск : ИжГТУ, 2017. – С. 324–330.

30. Акустический микроскоп : пат. 2613339 Рос. Федерация / В. Б. Дементьев, Ю. К. Шелковников, Н. И. Осипов, К. С. Ермолин. – Опубл. 16.03.2017.

Yu. K. Shelkovnikov, DSc in engineering, profesor, chief researcher
E-mail: yushelk@mail.ru
N. I. Osipov, CSc in engineering, senior researcher
E-mail: iit@udman.ru
K. S. Ermolin, junior researcher
E-mail: ermolin@udm.ru
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia
A. A. Meteleva, student
E-mail: meteleva-nami@rambler.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Application of the Photopotentiometric Variant of the Scanistor Inclusion in Problems of Automatic Control over the Space-Time State of the Object

The problems of the influence of dynamic error in the control of coordinates, velocities and accelerations of fast moving objects are considered. The principles of constructing information-measuring systems based on the photopotentiometric mode of the scanistor inclusion are described. It is shown that the photopotentiometric mode of operation makes it possible to significantly increase the availability of time and time.

Keywords: scanistor information-measuring system, differential switching mode, light zone, video signal.

УДК 681.2.002.56

И. В. Штенников, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой
И. А. Мельников, магистрант
E-mail: mely1551994@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Разработка устройства бесконтактного контроля температуры резистивного испарителя в вакуумных установках

Предложено устройство на программируемом микроконтроллере для бесконтактного контроля температуры резистивного испарителя в вакуумных установках с помощью ИК-датчика температуры.

Ключевые слова: температура, бесконтактный контроль, резистивный испаритель, ИК-датчик температуры, микроконтроллер.

Способ бесконтактного измерения температуры находит широкое применение в промышленном производстве, научных исследованиях при контроле режимов и управлении технологическими процессами, предотвращении аварийных ситуаций и т. п. [1]. Этот способ позволяет контролировать температуру тел, объектов в интервале от –50 °С до +4000 °С, находящихся в труднодоступных местах, под напряжением, тел вращения и т. д. [1–3].

Примером такого тела, для которого необходимо осуществлять контроль температуры, является резистивный испаритель, используемый в процессе вакуумного хромирования полых деталей [4, 5]. С температурой испарителя тесно связана скорость конденсации испаряемого вещества, один из важных параметров получения покрытий в вакууме [6, 7]. Поэтому для получения качественного покрытия необходимо своевременно контролировать и управлять температурным режимом работы резистивного испарителя.

На рис. 1 приведена схема установки вакуумного хромирования полых деталей.

Для нанесения покрытия деталь *1* (образец) устанавливается в центрирующей втулке *4*, которая тепло- и электроизолирована керамической шайбой от основания. Центрирующая втулка *4* имеет отверстия

© Штенников И. В., Мельников И. А., 2018

для выхода остаточных газов из полости детали и контроля температуры испарителя. Соосно детали *1* устанавливается проволочный (стержневой) испаритель *2* – источник материала покрытия, подключаемый к источнику питания ИП-1.

В вакуумной камере непосредственно перед нанесением покрытия с помощью нагревателя *3*, подключенного к источнику питания ИП-2, деталь *1* подогревается до некоторой начальной температуры. Затем путем пропускания электрического тока от источника питания ИП-1 испаритель *2* разогревают до температуры, при которой происходит испарение материала покрытия с испарителя. Образовавшийся поток пара, конденсируясь на внутренней поверхности детали *1*, образует защитное покрытие.

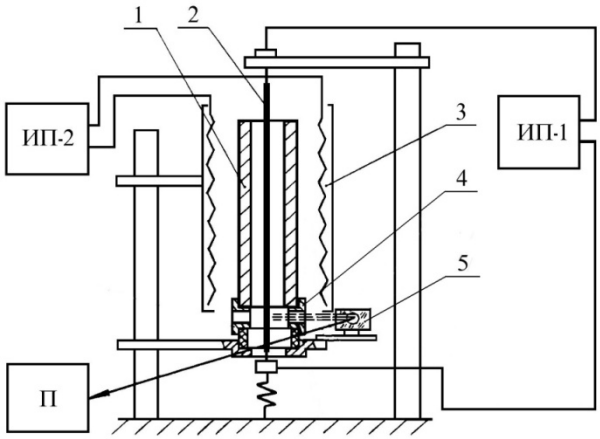


Рис. 1. Схема установки вакуумного хромирования:
1 – деталь, *2* – испаритель, *3* – нагреватель, *4* – центрирующая втулка, *5* – отражатель

Для контроля температурного режима работы испарителя применяется устройство бесконтактного контроля температуры испарителя в вакуумных установках [8, 9]. Через отверстие в центрирующей втулке *4* излучение испарителя вместе с потоком испаряемого материала попадает на отражающую поверхность отражателя *5*. Отразившееся излучение испарителя через смотровое окно вакуумной установки поступает в пирометр П, а поток испаряемого материала конденсируется на поверхности отражателя, не изменяя его оптических свойств, т. к. его отражающая поверхность предварительно покрыта слоем испаряемого материала.

В составе устройства бесконтактного контроля температуры испарителя рассматривается возможность применения ИК-датчика температуры, располагающегося непосредственно в вакуумной камере, входящего в состав технологической оснастки для нанесения покрытия. Предполагается ИК-датчик температуры расположить в нижней части оснастки, соединив его с центрирующей втулкой *4* (рис. 1). На рис. 2 приведена схема размещения ИК-датчика температуры в системе бесконтактного контроля температуры испарителя в вакуумных установках.

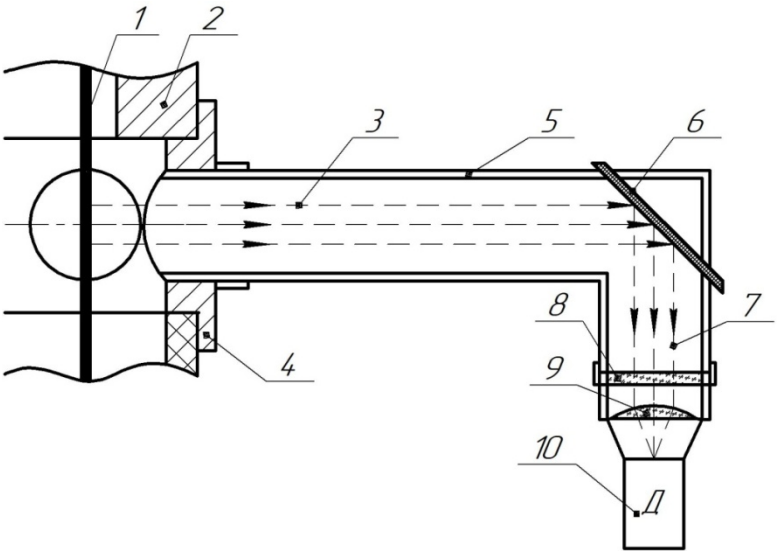


Рис. 2. Схема расположения ИК-датчика температуры в системе бесконтактного контроля температуры резистивного испарителя: *1* – испаритель, *2* – деталь, *3* – излучение испарителя вместе с испаряемым материалом, *4* – центрирующая втулка, *5* – канал, *6* – отражатель, покрытый слоем испаряемого материала, *7* – отразившееся излучение, *8* – защитное сменное стекло, *9* – оптическая система, *10* – ИК-датчик температуры

Излучение испарителя *1* вместе с потоком испаряемого вещества *2* по каналу *3* попадают на отражатель *4*, предварительно покрытый слоем испаряемого материала. Пары испаряемого вещества конденсируются на нем, а излучение испарителя отражается и попадает в оптическую систему *8* ИК-датчика температуры *9*. Защитное сменное стекло *7* предотвращает возможное попадание паров испаряемого вещества на оптическую систему *8* ИК-датчика температуры *9*.

На рис. 3 приведена структурная схема устройства бесконтактного контроля температуры испарителя в составе устройства автоматического поддержания температуры испарителя в процессе нанесения покрытия.

Аналоговый сигнал с ИК-датчика температуры преобразуется в цифровой и поступает на микроконтроллер, где обрабатывается и подается на регулятор, управляющий работой источника питания испарителя ИП-1. Температура испарителя поддерживается регулятором в соответствии с заданным режимом, заложенным в программируемом микроконтроллере. При этом численное значение температуры испарителя выводится на информационное табло.

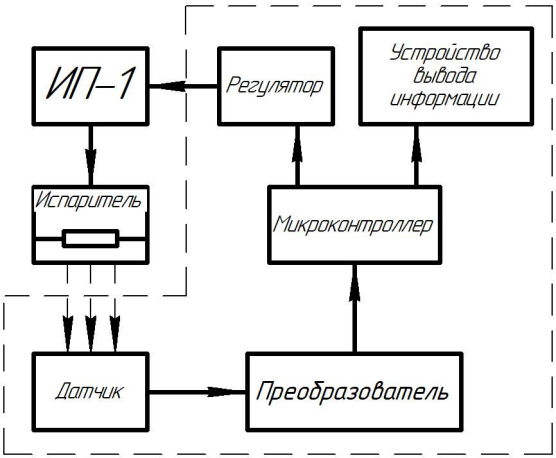


Рис. 3. Структурная схема устройства контроля и автоматического поддержания температуры испарителя

Для проработки устройства бесконтактного контроля температуры испарителя разработан прототип данного устройства. В прототипе устройства использован цифровой ИК датчик температуры MLX90614, микроконтроллер ATmega 8, LCD дисплей 16×2. Принципиальная схема прототипа устройства приведена на рис. 4.

Информация о температуре поступает с ИК-датчика DH1 MLX9061 на 8-разрядный высокопроизводительный AVR микроконтроллер D1 ATmega 8 по I2C (IIC) интерфейсу. В соответствии с программой микроконтроллера информация о температуре объекта обрабатывается, и с вывода PB0 выходной сигнал подается на регулятор для авто-

матического поддержания заданной температуры объекта. Кроме этого информация выводится на 2-строчный 16-символьный LCD дисплей. Программа для микроконтроллера выполняется с помощью ПО CodeVisionAVR на языке Си [10].

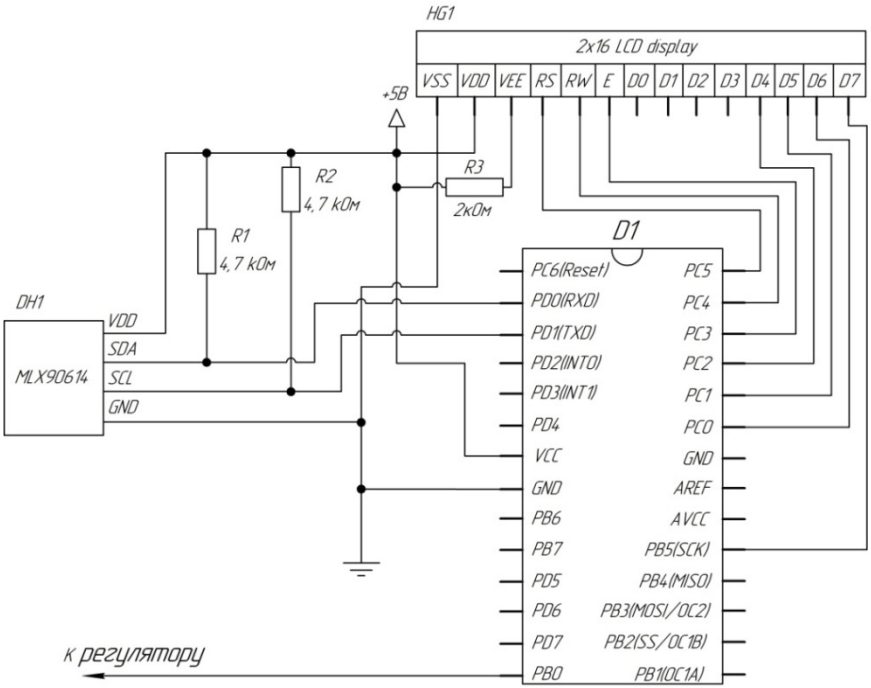


Рис. 4. Принципиальная схема прототипа устройства

Для практической реализации бесконтактного метода контроля температуры резистивного испарителя в установках вакуумного хромирования необходимо подобрать ИК-датчик, способный работать в условиях технологического процесса получения покрытий в вакууме.

Учитывая высокую рабочую температуру объекта измерения – резистивного испарителя с $T_{\text{исп}}$ = 1400–1550 °С [11, 12] и повышенную температуру в рабочем объеме вакуумной камеры установки – T = 200–300 °С [13], в качестве ИК-датчика температуры возможно применение пирометра ENG r-45, в исполнении для работы в тяжелых промышленных условиях с техническими характеристиками: температура измеряемого объекта – от 0° до 3200 °С, рабочая температура –

от 0° до 250 °С, высокое оптическое разрешение (40:1; 62,5:1; 80:1; 100:1; 180:1) [14].

Применение ИК-датчика в системе бесконтактного контроля температуры испарителя в вакуумных установках позволит в автоматическом режиме измерять температуру испарителя, управлять и поддерживать заданный температурный режим работы резистивного испарителя для получения покрытия с необходимыми свойствами и структурой.

Список литературы

1. *Неделько, А.* Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры [Электронный ресурс] // Фотоника. – 2013. – № 1. – С.102–109. – URL: http://www.photonics.su/journal/article/3590 (дата обращения: 30.10.2017).

2. ГОСТ 28243-96. Пирометры. Общие технические требования [Электронный ресурс]. – URL: http://gostrf.com/normadata/1/4294826/4294826543.pdf (дата обращения: 07.11.2017).

3. Аппаратура и методика измерения силовых параметров процесса В.Т.М.О. винтовым обжатием / О. И. Шаврин, А. В. Трухачев, В. Б. Дементьев, И. В. Штенников // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1985. – № 3. – С. 78–81.

4. *Ушаков, В. В.* Повышение эффективности процесса хромирования стальных изделий / В. В. Ушаков, В. И. Сидоренко, О. И. Шаврин // Автоматизация и механизация трудоемких процессов : тез. науч. докл. – Устинов : Удмуртия, 1984. – С. 37–38.

5. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий : пат. 1487486 Рос. Федерация : МКИ С23С 14/00 / Сидоренко В. И., Штенников И. В., Яриков А. Б. – № 4107792/24-21 ; заявл. 04.06.86.

6. Повышение качества поверхности и плакирование металлов : справочник / под ред. А. Кнаушнера. – М. : Металлургия, 1984. – 368 с.

7. Жаростойкость литейных никелевых сплавов и защита их от окисления. / Б. Е. Патон, Г. В. Строганов, С. Т. Кишкин и др. – Киев : Наук. думка, 1987. – 256 с.

8. Устройство для бесконтактного контроля температуры испарителя в вакуумных установках: а. с. 1241839 СССР : кл. G 01 J 5/08, 30.10.1984 / О. И. Шаврин, В. И. Сидоренко, И. В. Штенников.

9. *Штенников, И. В.* Устройство бесконтактного контроля температуры резистивного испарителя // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов X Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Ижевск, 12–14 нояб. 2014 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 336–339.

10. *Прокопенко, В. С.* Программирование микроконтроллеров ATMEL на языке С. – М. : Додэка XXI, 2012. – 320 с.

11. *Сидоренко, В. И.* Конусообразные кристаллиты в структуре хромовых покрытий / В. И. Сидоренко, И. В. Штенников // Приборостроение в XXI веке. Интеграция науки, образования и производства : тр. науч.-техн. конф. – Ижевск : Изд. дом «Удмуртский университет», 2001. – С. 48–52.

12. *Сидоренко, В. И.* Исследование вакуумных конденсатов хрома / В. И. Сидоренко, И. В. Штенников // Моделирование технических систем и технологий : сб. науч. ст. – Ижевск : ИжГТУ, 1996. – С. 97–99.

13. *Сидоренко, В. И.* Математическая модель теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей / В. И. Сидоренко, И. В. Штенников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2017. – Т. 15, № 2. – С. 71–76.

14. Группа компаний «Энергосила». Стационарный пирометр ENG r-45 [Электронный ресурс]. – URL:http://inergosila.ru/catalog/ pyrometers/stationary-pyrometers/stationary-pyrometer-eng-r-45.php (дата обращения: 30.10.2017).

I. V. Shtennikov, CSc in engineering, assoc. professor, head of department
I. A. Melnikov, magister student
E-mail: mely1551994@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Development of the Device of Contactless Control of Resistive Evaporator Temperature in Vacuum Installations

The device is offered with programmable microcontroller for contactless control of resistive evaporator temperature by using a IR temperature sensor.

Keywords: temperature, contactless control, resistive evaporator, IR temperature sensor, microcontroller.

УДК 621.375.41

И. В. Штенников, канд. тех. наук, доц., зав. кафедрой
В. И. Черешев, магистрант
E-mail: vitaliicheresev@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Методика приготовления образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium» для исследования ее электрической прочности

Разработана методика приготовления плоских образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium». Исследованы и выбраны материалы, сопутствующие приготовлению опытных образцов жидкой изоленты «Nano 4 Premium», исследована их электрическая прочность.

Ключевые слова: электрическая прочность, диэлектрик, жидкая изолента, образцы, испытания.

Введение

Для определения электрической прочности вновь разрабатываемой жидкой изоленты «Nano 4 Premium» в работе [1] была предложена методика приготовления образцов из этого материала. Испытуемый диэлектрик в жидком состоянии помещался между слоями листового твердого диэлектрика – электрокартона или пленкоэлектрокартона. Плоская металлическая пластина, устанавливаемая сверху, обеспечивала равномерное распределение жидкой изоленты между слоями листовых диэлектриков. Под действием груза образцы выдерживались в течение 24–96 часов при комнатной температуре до полного затвердевания – полимеризации жидкого диэлектрика. В дальнейшем полученные таким образом трехслойные образцы подвергались испытаниям на электрическую прочность и по их результатам судили об электрической прочности жидкой изоленты «Nano 4 Premium».

Однако после испытаний при подробном рассмотрении трехслойных образцов выявлено, что полимеризация жидкой изоленты между листовыми диэлектриками прошла не полностью. В середине образца изолента, не зависимо от длительности времени полимеризации, имела вязко-текучее жидкое состояние, что является существенным фак-

© Штенников И. В., Черешев В. И., 2018

тором, снижающим величину электрической прочности испытуемого диэлектрика [2].

Постановка задачи

В связи с этим необходимость разработки новой методики приготовления образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium» для исследования ее электрической прочности остается актуальной.

Для этого, на первоначальном этапе разработки были проведены исследования различных материалов, сопутствующих приготовлению плоских образцов, применение которых обеспечивало бы получение образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium» без разрушения и дефектов при отделении их от изоленты после ее полимеризации – затвердевания.

Описание эксперимента

В качестве материалов, сопутствующих приготовлению образцов из жидкой изоленты, экспериментально исследованы и опробованы: целлофановая пленка, стекло от фотопластинок, имеющее ровную, плоскую поверхность, ситалловые пластинки с гладкой поверхностью низкой шероховатости. Также опробована текстурная бумага и ее защитная пленка.

Перед приготовлением образцов из жидкого диэлектрика поверхность листовых сопутствующих материалов протиралась хлопчатобумажной тканью от пыли и возможных загрязнений. В дальнейшем на этот материал, размещаемый на горизонтальной гладкой твердой поверхности, наносилось некоторое количество жидкой изоленты «Nano 4 Premium». Поверх изоленты располагался слой этого же листового материала, на который наносилась изолента. Для получения тонкого и равномерного по толщине слоя образца исследуемого диэлектрика на него помещался груз (в случае пленочных листовых материалов поверх их располагалось стекло большего размера, на котором в свою очередь размещался груз). В таком виде образцы выдерживались при комнатной температуре и влажности до полного затвердевания. Время выдержки составляло 24–48 часов. В ряде случаев время выдержки было увеличено до 72–120 часов с целью исследования длительности выдержки на электрическую прочность диэлектрика.

Результаты и их обсуждение

При использовании целлофановой пленки после полимеризации жидкой изоленты поверхность образцов имела неровный, волнистый характер (рис. 1, *а*). Целлофановая пленка не отделялась от образца. Также из-за высокой адгезии не удалось отделить стеклянные и ситал-

ловые пластинки от изоленты «Nano 4 Premium» после ее полимеризации (рис. 1, *б*, *в*).

В случае текстурной бумаги установлено частичное ее отделение по краю образца. К середине образца она имела прочное соединение с изолентой. В целом отделить текстурную бумагу от образца жидкой изоленты после ее полимеризации не удалось.

Только при использовании защитной пленки от текстурной бумаги в результате проведенных исследований удалось получить плоские образцы жидкой изоленты «Nano 4 Premium». Защитная пленка отделялась от жидкой изоленты после ее полимеризации и позволила получить образцы исследуемого диэлектрика без повреждений и дефектов, пригодных для испытания электрической прочности – рис. 1, *г*.

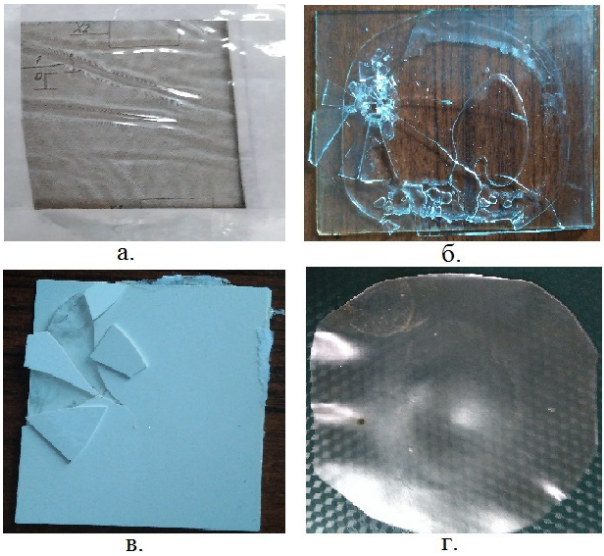


Рис. 1. Результаты исследования материалов, использованных для приготовления образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium»: *а* – целлофановая пленка, *б* – стекло фотопластинок, *в* – ситалл, *г* – защитная пленка

В дальнейшем по данной методике с использованием защитной пленки приготовлен ряд плоских образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium» для испытаний. Толщина образцов измерялась микрометром типа МР. Определение их электрической прочности производилось по ГОСТ 6433.3-71 [3] в направлении, перпендикулярном поверхности плоского образца на высоковольтном аппарате АИИ-70.

Каждый образец помещался в измерительную ячейку (рис. 2) между двумя подпружиненными цилиндрическими электродами диаметров 25 и 50 мм [3]. После этого измерительная ячейка устанавливалась в аппарат АИИ-70 для определения пробивного напряжения испытуемого диэлектрика.

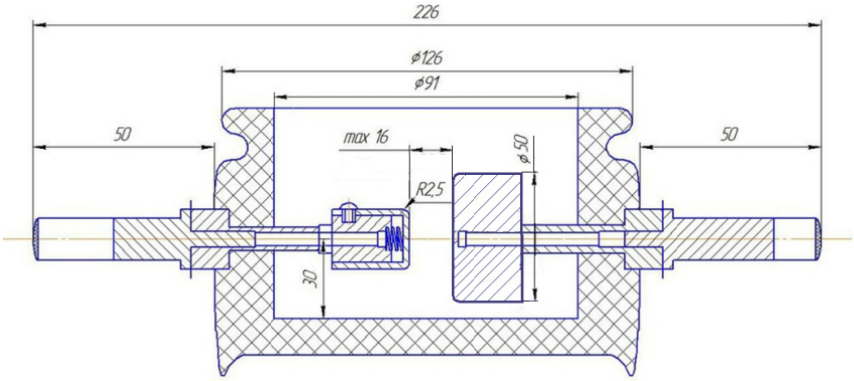


Рис. 2. Измерительная ячейка

Результаты исследования электрической прочности полученных образцов жидкой изоленты «Nano 4 Premium» приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Результаты исследования электрической прочности жидкой изоленты «Nano 4 Premium»**

№ п/п	Толщина образца, мм	Напряжение пробоя $U_{пр}$, кВ	Электрическая прочность $E_{пр}$, кВ/мм	Среднее значение электрической прочности, кВ/мм
1	1,27	7	5,5	7,0
2	1,29	10	7,8	
3	1,43	6	4,2	
4	1,3	9	6,9	
5	1,24	13	10,5	

Проведенные исследования показали, что электрическая прочность жидкой изоленты «Nano 4 Premium» не уступает прочности диэлектриков, применяемых в промышленности. В табл. 2, полученные значения электрической прочности приведены в сравнении с величинами некоторых широко распространенных электроизоляционных материалов [4]. Из

сравнительного анализа следует, что жидкую изоленту «Nano 4 Premium» допустимо применять в качестве электроизоляционного материала при соответствующих значениях высокого напряжения.

Таблица 2. **Электрическая прочность некоторых диэлектриков [4] в сравнении с жидкой изолентой «Nano 4 Premium»**

№ п/п	Наименование диэлектрика	Электрическая прочность, кВ/мм
1	Бумага кабельная сухая	6–9
2	Электрокартон сухой	8–10
3	**Жидкая изолента «Nano 4 Premium»**	**4,2–10,5**
4	Электрокартон, пропитанный маслом	12–17
5	Бумага, пропитанная маслом	10–25
6	Парафин	15–30

Выводы

В результате проведенных исследований ряда листовых материалов, сопутствующих приготовлению образцов из твердеющих, полимеризующихся диэлектриков, подобран материал – защитная пленка текстурной бумаги, пригодная для приготовления образцов из жидкой изоленты «Nano 4 Premium». По разработанной методике изготовлен ряд плоских образцов из данного диэлектрика, определена его электрическая прочность.

Список литературы

1. *Штенников, И. В.* Методика определения электрической прочности жидкой изоленты // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С 410–414.

2. *Важов, В. Ф.* Техника высоких напряжений : курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.

3. ГОСТ 6433.3-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определение электрической прочности при переменном (частотой 50 Гц) и постоянном напряжении [Электронный ресурс] // Библиотека ГОСТов и нормативов. – URL: http://www.internet-law.ru/gosts/gost/42383/ (дата обращения 29.10.2017)

4. Электроизоляционные материалы [Электронный ресурс]. – URL: http://scask.ru/book_oet.php?id=9 (дата обращения 29.10.2017).

I. V. Shtennivov, CSc in engineering, associate professor, head of department
V. I. Chereshev, magister student
E-mail: vitaliicheresev@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Methods of Sample Preparation of Liquid Electrical Tape "Nano 4 Premium" for the Study of Its Electric Strength

The technique of making flat samples of liquid electrical tape "Nano 4 Premium". Researched and selected materials associated with preparation of prototypes of liquid electrical tape "Nano 4 Premium", and investigated their dielectric strength.

Keywords: electric strength, dielectric, liquid electrical tape, samples, tests.

УДК 621.312

А. А. Штин, канд. техн. наук, доц.
О. С. Мельников, студент
E-mail: melnikovoleg2017@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Лабораторный стенд для исследования трансформаторов тока

Статья посвящена разработке лабораторного стенда для исследования трансформаторов тока. Стенд предназначен для измерения фазовой погрешности и коэффициента трансформации.

Ключевые слова: лабораторный стенд, измерение, фазовая погрешность, микропроцессорные приборы, коэффициент трансформации.

Измерительные трансформаторы широко используются в электроэнергетике. При исследовании трансформаторов тока важными являются метрологические характеристики, такие как фазовая погрешность и коэффициент трансформации [1].

Для того чтобы студенты в учебном процессе могли изучать эти характеристики, было принято решение изготовить лабораторный стенд.

© Штин А. А., Мельников О. С., 2018

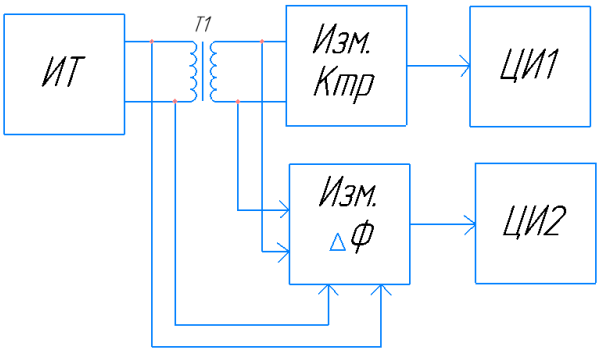


Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда: ИТ – источник тока, ЦИ – цифровой индикатор, $К_{тр}$ – коэффициент трансформации, $\Delta\varphi$ – фазовая погрешность

Стенд разработан с использованием современной элементной базы и позволяет автоматически измерять коэффициент трансформации и фазовую погрешность [2]

Структурная схема устройства показана на рис. 1.

На рис. 2. представлена электрическая принципиальная схема лабораторного стенда.

Принцип работы лабораторного стенда заключается в следующем: питание всех микросхем осуществляется от двуполярного источника питания ± 12 В. Для измерения фазовой погрешности трансформатора на вход микросхемы U2 подается сигнал синусоидальной формы с первичной обмотки трансформатора T1. На вход микросхемы U1 подается сигнал синусоидальной формы со вторичной обмотки трансформатора T1. С выходов микросхем U1 и U2 сигналы прямоугольной формы подаются на вход микросхемы U3, которая передает полученные значения на осциллограф PS1.

Для измерения коэффициента трансформации сигнал со вторичной обмотки трансформатора T1 передается на микросхему U4, включенную в режим деления. С выхода микросхемы U4 на осциллограф PS2.

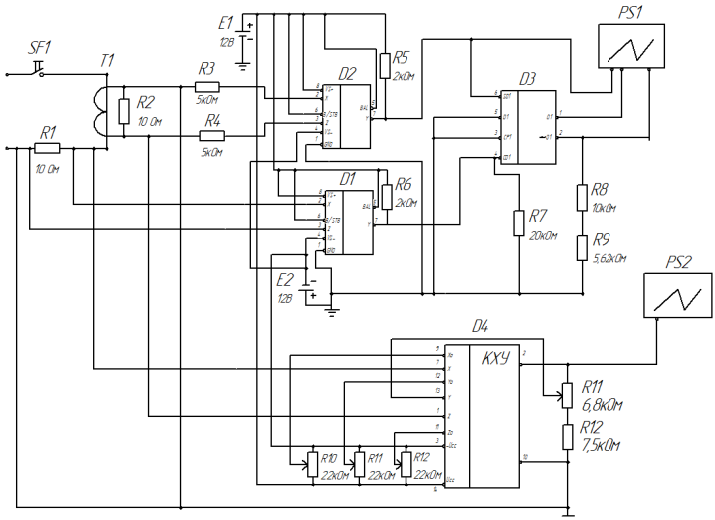


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема лабораторного стенда

Макет лабораторного стенда представлен на рис. 3.

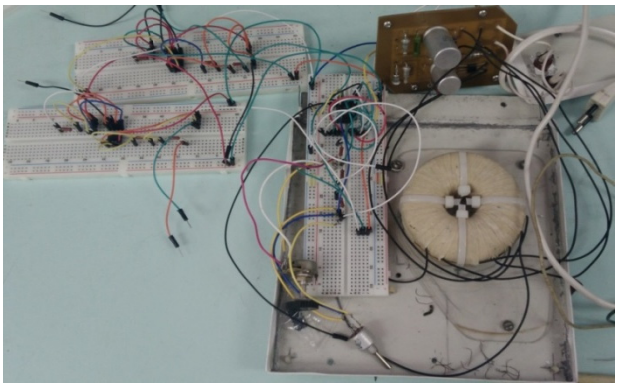


Рис. 3. Макет лабораторного стенда

Схема для измерения фазовой погрешности, смоделированная в среде Multisim, представлена на рис. 4. Для определения фазовой погрешности и коэффициента трансформации были выбраны микросхемы: LM311N – компаратор напряжения; КР525ПС2А – аналоговый перемножитель сигналов с операционным усилителем на выходе, включенный в режим деления; 4013BD – двойной D-триггер [3].

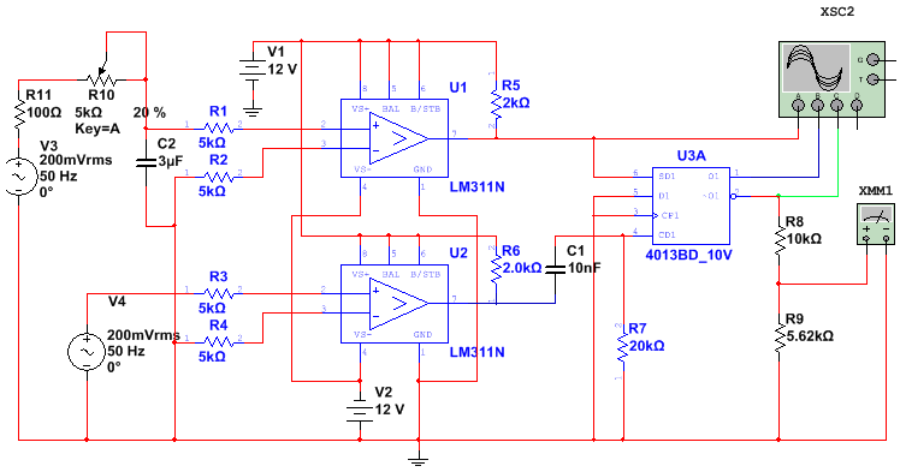


Рис. 4. Схема для измерения фазовой погрешности

Результаты испытания лабораторного стенда

Осциллограмма при измерении фазовой погрешности в среде Multisim представлена на рис. 5.

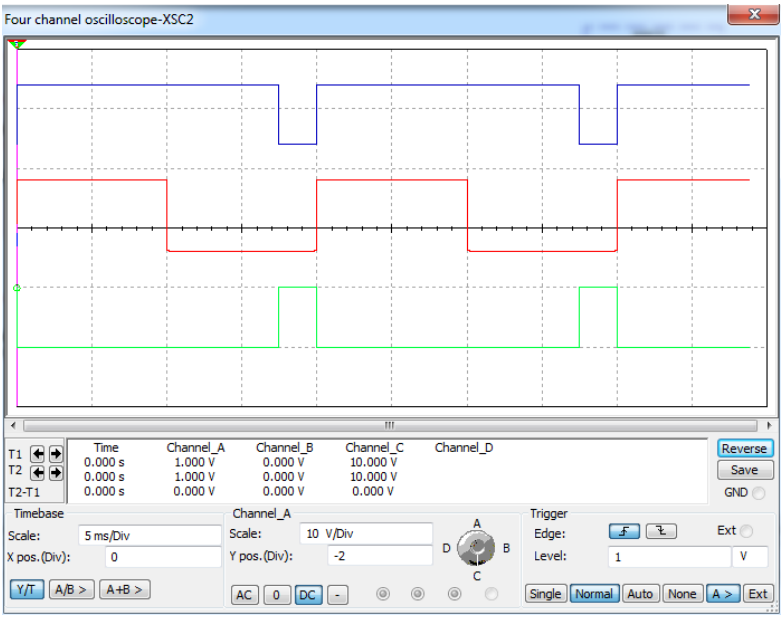


Рис. 5. Осциллограмма фазовой погрешности в среде Multisim

Осциллограмма, снятая с макета, представлена на рис. 6.

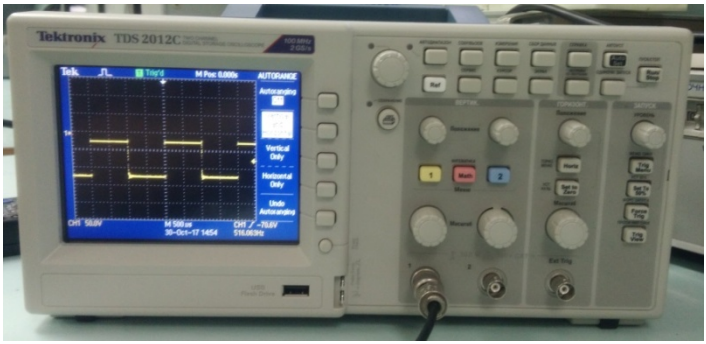


Рис. 6. Показания осциллографа при испытании макета лабораторного стенда

Выводы

Проверен макет лабораторного стенда для исследования трансформатора тока. С помощью данного стенда можно измерить фазовую погрешность и коэффициент трансформации любого подключенного трансформатора тока.

Список литературы

1. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / под общ. ред. Б. Н. Тихонова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 374, с. : ил.

2. Все отечественные микросхемы. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Додэка-XXI, 2004. – 400 с.

3. Интегральные микросхемы : справ. пособие / под ред. В. Г. Игнатовича. – Минск : Изд. Аникеенко В. Ф., 1997. – 64 с. : ил.

A. A. Shtin, CSc in engineering, associate professor
O. S. Melnikov, magister student
E-mail: melnikovoleg2017@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Laboratory Stand for the Study of Current Transformers

The article is devoted to the development of a laboratory stand for the study of current transformers. The bench is intended for measuring phase error and transformation ratio.

Keywords: laboratory stand, measurement, phase error, microprocessor devices, coefficient of transformation.

УДК 620.179.142

Д. А. Юсупов, инженер-программист
E-mail: ivt_po@mail.ru
ООО «Ижевский институт комплексного приборостроения», г. Ижевск

Измеритель толщины неферромагнитных материалов

В статье рассматривается проблема контроля качества производимой продукции. Описан магнитный подход, используемый для определения значения толщины измеряемого объекта. Толщина определяется путем измерения плотности магнитного потока с помощью датчика Холла.

Ключевые слова: измеритель толщины, магнитный подход, датчик Холла, контроль качества стеклотары.

Введение

В настоящее время, при рыночных отношениях, производитель уделяет большое внимание вопросу дефектоскопии производимой продукции для обеспечения стабильного качества и надежности. Процесс контроля качества заключается в установлении соответствия действительных значений физических величин установленным предельным значениям.

Постановка задачи

Для обнаружения дефектов используется широкий спектр методов неразрушающего контроля (НК). Современная классификация методов НК включает девять видов контроля: электрический, магнитный, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, визуально-измерительный, радиационный, акустический и проникающими веществами. Методы НК основываются на использовании физических явлений для обнаружения дефектов. В свою очередь неразрушающие методы контроля подразделяются на пассивные и активные.

К активным относятся методы, в которых измеряется изменение возбуждаемого физического поля, а к пассивным – использующие свойства физического поля, возбуждаемого самим контролируемым объектом.

Активными методами являются: визуальный и измерительный контроль, ультразвуковая дефектоскопия, магнитный, радиографический капиллярный, метод вихревых токов, электрический.

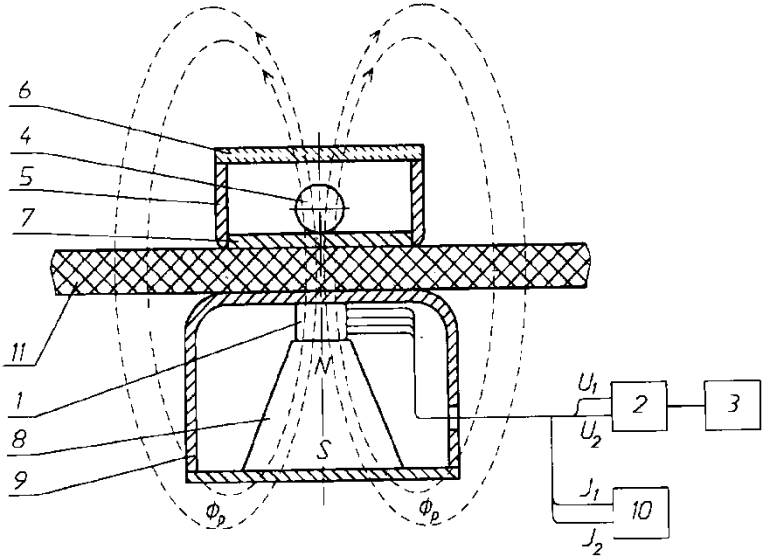
© Юсупов Д. А., 2018

К пассивным методам относятся: тепловизионный, виброакустический и методы акустической эмиссии [1].

В рамках данной статьи рассматривается определение толщины объекта как параметр контроля качества.

Описание эксперимента

На данный момент самыми распространенными решениями для определения толщины объекта являются: метод вихревых токов, магнитный метод, ультразвуковая дефектоскопия. Ввиду имеющихся наработок в области магнитного метода он и был выбран. Данный метод основан на измерении плотности магнитного потока, проходящего через сердечник магнита [4]. Стоит отметить, что данный метод позволяет определять толщину только неферромагнитных материалов. На основе этого метода был разработан прибор, принцип работы которого представлен на рисунке.



Принцип работы прибора: *1* – датчик Холла, *2*, *3* – усилители, *4* – вспомогательный элемент, *5* – контейнер, *6* – окно для наблюдения, *7* – дно контейнера, *8* – постоянный магнит, *9* – измерительная головка устройства, *10* – блок питания, *11* – объект измерения

Устройство содержит датчик Холла *1*, сигнальные выходы которого через усилитель *2* (входы U1, U2) подключены к входу отсчетного индикатора *3*, вспомогательный элемент *4*, выполненный в виде фер-

ромагнитного шарика, размещенный в контейнере *5*, с открытым для наблюдения окном *6* и дном *7*, выполненный из ферромагнитного материала. Постоянный магнит *8*, имеющий форму усеченного конуса, с размещенным на нем датчиком Холла *1* образуют измерительную головку устройства *9*. Блок питания *10* своими выходами I_1, I_2 подключен к токовым выводам датчика Холла *1*.

Устройство работает следующим образом. Объект измерения – неферромагнитную пластину *11* – помещают между измерительной головкой *9* и контейнером *5*. Затем контейнер 5 с расположенным в нем шариком 4 центрируют относительно головки, передвигая его таким образом, чтобы шарик оказался в центре круга, центр которого расположен в геометрическом центре пластины *7*. При этом в силу наличия концентратора поля у магнита *8*, выполненного в виде усеченного конуса, шарик всегда центрируется так, что оси шарика, датчика Холла и магнита совпадают, несмотря на то, что измерительная головка *9* может быть скрыта от наблюдателя измеряемым материалом *11*. При этом магнитный поток Φ_p рассеяния от магнита *8* замыкается через датчик *1* Холла, измеряемый материал *11* и вспомогательный элемент *4* и дно *7* контейнера *5*. Значение Φ_p зависит от толщины материала *11*. В соответствии с изменением толщины измеряемого материала изменяется значение электродвижущей силы (ЭДС) датчика *1* Холла, напряжение на выходе усилителя *2* и показание индикатора *3*. Ферромагнитная пластина *7* – дно контейнера *5* – позволяет увеличить поток Φ_p рассеяния через датчик *1* при одинаковой толщине измеряемого материала, а значит и позволяет увеличить сигнал на выходе усилителя *2*. Это дает возможность уменьшить погрешность измерения и расширить диапазон измеряемых величин в сторону их увеличения.

Значение ЭДС с датчика Холла обрабатывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Далее производится выборка значений и последующая фильтрация по алгоритму рекурсивных скользящих средних [2, 3]. Данный алгоритм обеспечивает достаточную фильтрацию и необходимое быстродействие, что является одним из основных критериев для данного прибора. На основе отфильтрованных данных происходит вычисление толщины измеряемого материала на основе градуированной шкалы зависимости данных АЦП и толщины. Эмпирическим путем выявлена зависимость данных АЦП и толщины, представляющая собой логарифмическую функцию. Для каждого прибора осуществляется градуировка шкалы зависимости данных АЦП от толщины на стадии регулировки прибора. Данная зависи-

мость на каждом приборе незначительно отличается, т. к. постоянные магниты, находящиеся в измерительных головах приборов, имеют разную магнитную проницаемость.

Результаты и их обсуждение

В процессе разработки выяснилось, что зависимость значения магнитного потока от толщины измеряемого объекта имеет логарифмическую зависимость. Результатом разработки является прибор для измерения толщины неферромагнитных материалов с диапазоном измеряемых толщин от 0,05 до 12,00 мм.

Для обеспечения охвата данного диапазона применяется несколько индукторов (вспомогательный элемент *4* на рисунке.) с разной магнитной проницаемостью. Погрешность прибора не превышает 3 %. Проведены испытания прибора, присвоена литера $О_1$. Налажено серийное производство.

Прибор имеет патент № 2222776 и является средством измерения (регистрационный № 57493-14).

Выводы

Прибор для измерения толщины неферромагнитных материалов, использующий магнитный подход, достаточно надежен, универсален и прост в использовании. Главным недостатком прибора является то, что для измерения необходимо иметь доступ к обеим сторонам измеряемого объекта.

Список литературы

1. *Богнер, Р.* Введение в цифровую фильтрацию / Р. Богнер, А. Константинидис ; пер. с англ. под ред. Л. И. Филиппова. – М. : Мир, 1976. – 212 с.

2. *Курячий, М. И.* Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / Томск. гос. ун-т упр. и радиоэлектроники. – Томск, 2009. – 190 с.

3. *Стивен, В.* Научно-техническое руководство по цифровой обработке сигналов. – 2-е изд. – Сан-Диего, Калифорния : Калифорн. техн. изд-во, 1999. – 655 с.

4. *Миткевич, В. Ф.* Магнитный поток и его преобразования. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1946. – 355 с.

D. A. Yusupov, software engineer
E-mail: ivt_po@mail.ru
Izhevsk Institute of Comprehensive Instrument Making, Izhevsk, Russia

Thicness Gage for Non-Ferromagnetic Materials

The article considers problem of quality control of manufactured object. A magnetic approach is used to determine the thickness of measured object. Thickness determined by measuring the magnetic flux density using a Hall sensor.

Keywords: thickness gauge; magnetic approach; Hall Sensor; quality control of glass containers.

Секция 4. **Информационные технологии в радиотехнике и связи**

УДК 621.396.67

М. А. Бояршинов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: mabkb@istu.ru
А. В. Балашов, магистрант
E-mail: balashov.a.v@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Моделирование работы средств радиоэлектронного подавления и их влияние на процесс передачи информации

В статье описана компьютерная модель средств радиоэлектронного подавления. Приведены результаты моделирования воздействия организованных помех на процесс передачи информации.

Ключевые слова: передача информации, радиолиния, радиоэлектронное подавление, организованные помехи.

В условиях информационных конфликтов разных уровней важными составляющими являются методы препятствования передачи информации. Поэтому для исследования оценки качества передачи необходимо иметь модель радиолинии под воздействием организованных помех. Работа посвящена моделированию воздействия организованных помех и эффекту от их воздействия на работу радиосистем передачи информации.

Радиоэлектронное подавление (РЭП) подразумевает снижение эффективности функционирования радиоэлектронных объектов противника путем воздействия на их приемные устройства энергией электромагнитного излучения (помехами). Воздействуя на приемные уст-

© Бояршинов М. А., Балашов А. В., 2018

ройства, помехи имитируют или искажают наблюдаемые и регистрируемые оконечной аппаратурой сигналы или изображения, затрудняют или исключают выделение полезной информации, ведение радиопереговоров.

Радиоэлектронные средства могут быть подавлены средствами РЭП, только если отношение мощности помехи, попадающей в полосу пропускания радиоприемника, к мощности сигнала превышает некоторое минимально необходимое значение, характерное для данного вида помехи и сигнала. Это отношение называют коэффициентом подавления по мощности [1]:

$$К_{П} = (\frac{P_{п}}{P_{с}})_{вх\ мин} \quad (1)$$

Для проведения моделирования функционирования приемной радиостанции в условиях деструктивных воздействий со стороны противника разработана компьютерная модель станции помех. Имитационная модель (рис. 1) включает в себя следующие составляющие:

- радиостанция, передающая сигнал;
- линия связи (модель распространения);
- источник естественных помех и шумов;
- радиостанция, принимающая сигнал;
- модель системы РЭП противника.

Модель приводит к таким же искажениям сигнала, как источники естественных помех искажают сигнал в радиоканале. При этом воздействие мультипликативной организованной помехи, т. е. воздействие средств РЭП на среду распространения, в данной модели не учитывается. После этого сигнал в радиоканале подвергается аддитивному воздействию организованной помехи. При этом на вход приемника приходит сигнал, состоящий из суммы трех составляющих: исходного сигнала, АБГШ и организованной помехи.

$$y(t) = s(t) + e(t) + n(t). \quad (2)$$

На рис. 2 представлена компьютерная реализация имитационной модели радиолинии. Компьютерное моделирование проведено в среде Simulink с использованием организованной помехи шириной 10 МГц и мощностью 100 Вт.

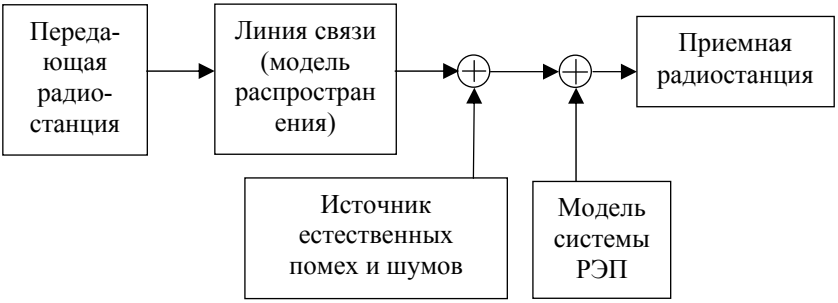


Рис. 1. Имитационная модель радиолинии

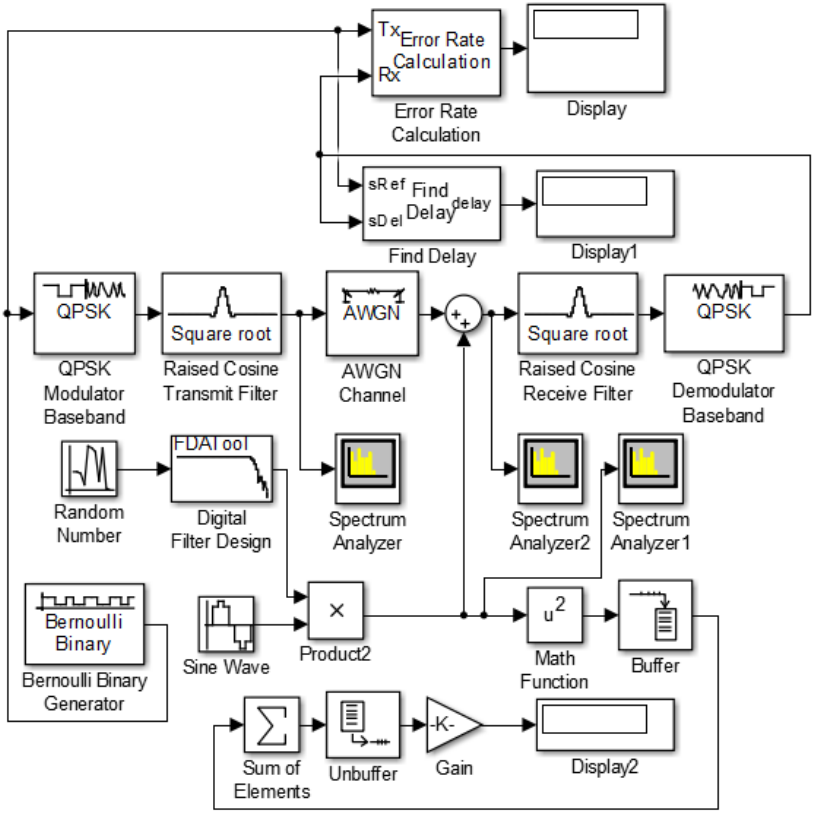
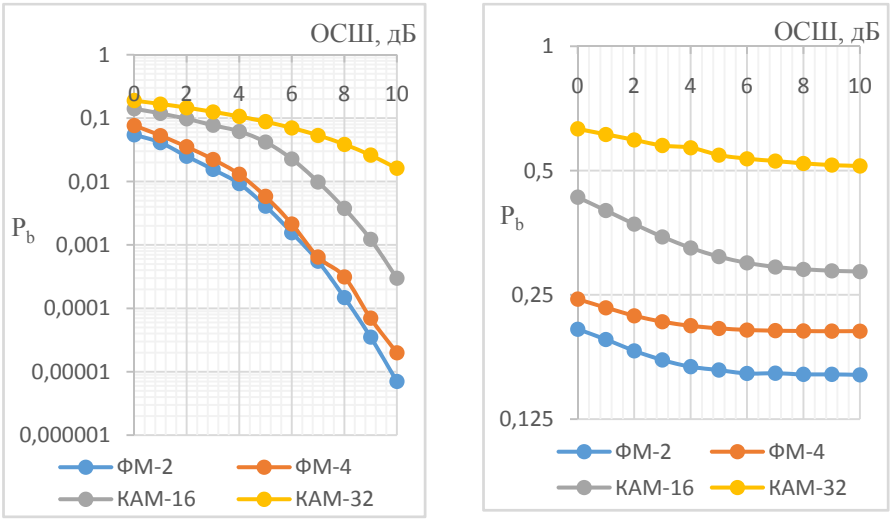


Рис. 2. Компьютерная модель радиолинии с организованной помехой

Исходный сигнал формируется в блоке Bernoulli Binary Generator (генератор случайного двоичного числа Бернулли). Затем сигнал преобразуется, проходя через модулятор (QPSK Modulator Baseband) и формирующий фильтр (Raised Cosine Transmit Filter), для передачи по радиоканалу с аддитивным белым гауссовым шумом АБГШ (AWGN Channel), в котором сигнал подвергается воздействию естественных шумов. Далее сигнал поступает на сумматор, где складывается (Product1) с организованной помехой. Организованная помеха формируется следующим образом: результат работы генератора гауссова шума (Random Number) проходит через фильтр (Digital Filter Design), который позволяет формировать помеху в различной полосе частот. Далее полоса шума умножается (Product2) на гармонический сигнал, который сгенерирован соответствующим блоком (Sine Wave), для переноса шума на определенную частоту. Далее сумма организованной помехи и передаваемого сигнала, подвергшегося влиянию естественных помех, поступает на вход согласующего фильтра (Raised Cosine Receive Filter), а затем демодулируется (QPSK Demodulator Baseband). На последнем этапе в блоке расчета коэффициента ошибок (Error Rate Calculation) сравниваются исходный сигнал и переданный сигнал и рассчитывается вероятность битовой ошибки, значение которой выводится на экран (Display). Блок Find Delay вычисляет задержку между исходным и переданным сигналами при прохождении всех блоков. Блоки Math Function, Buffer, Sun of Elements, Unbuffer, Gain, Display2 необходимы для вычисления мощности сигналов.

С помощью разработанной компьютерной модели проведен анализ помехоустойчивости ФМ- и КАМ-сигналов при воздействии организованных помех (рис. 3).

Из графиков видно, что при воздействии помех для всех видов модуляции, как и следовало ожидать, значительно увеличивается вероятность битовой ошибки на приемной стороне, с 10^{-3}–10^{-5} при наличии только шума определенного уровня до 0,15–0,5 при появлении организованной помехи при любом из исследованных видов модуляции. Однако наиболее помехоустойчивыми к организованным помехам из исследованных видов модуляций являются сигналы ФМ-2.



а *б*

Рис. 3. График зависимости вероятности ошибки на бит P_b от отношения сигнал/шум ОСШ для сигналов с разными типами модуляции в результате воздействия: *а* – только АБГШ; *б* – АБГШ с организованной помехой

С одной стороны, для подавления сигнала желательно поставить помеху в широком диапазоне частот. Однако мощность передатчика ограничена и с расширением полосы частот помехи мощность, приходящаяся на единицу полосы, уменьшается. В полосу сигнала попадает незначительная часть энергии помехи. Поэтому особенностью данных помех является то, что при неизменной мощности передатчика помех их спектральная плотность мощности $G_п$ (Вт/МГц) уменьшается по мере расширения спектра излучения. При равномерном спектре она представляет собой отношение энергетического потенциала передатчика помех $P_{пп}G_{пп}$ к ширине спектра частот помехи $f_п$ [2]:

$$G_п = \frac{P_{пп}G_{пп}}{f_п} \quad (3)$$

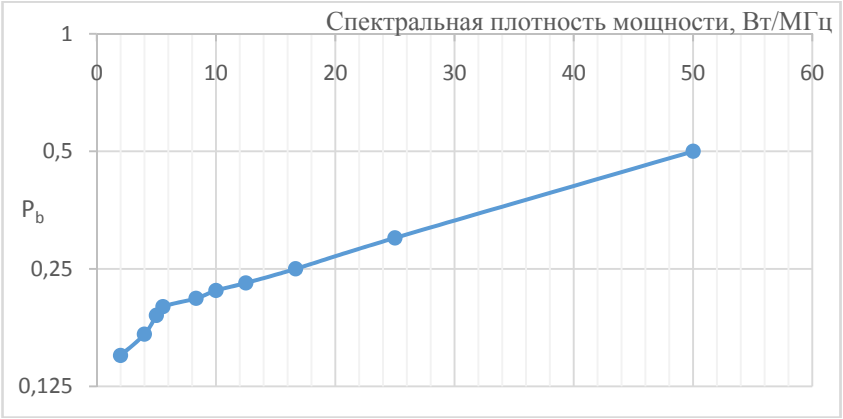


Рис. 4. График зависимости вероятности ошибки на бит P_b от спектральной плотности мощности при ФМ-4

Проведено моделирование, которое показало (рис. 4.), что при уменьшении спектральной плотности мощности уменьшается вероятность битовой ошибки, т. е. уменьшается влияние организованной помехи на передаваемый сигнал. Поэтому выгоднее использовать узкополосные помехи, которые могут быть реализованы маломощными передатчиками помех. Но в отличие от широкополосных помех, узкополосные помехи требуют наличия средств для своевременного и быстрого обнаружения сигнала, определения его параметров, т. к. эффективность их воздействия зависит от точности совмещения по частоте с сигналом. Для гарантии перекрытия полосы сигнала организованной помехой рекомендуется использовать помеху с полосой, превышающей полосу сигнала в 1,5–2 раза [2].

Таким образом, в работе представлена компьютерная модель средства РЭП. С ее помощью можно анализировать воздействие средств РЭП на работу радиолиний.

Список литературы

1. *Куприянов, А. И.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. – М. : Вузов. кн., 2011. – 800 с.: ил.

2. *Осипов, А. С.* Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП : учебник / под науч. ред. Е. Н. Гарина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 344 с.

M. A. Boyarshinov, CSc. in engineering, associate professor
E-mail: mabkb@istu.ru
A. V. Balashov, magister student
E-mail: balashov.a.v@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Modeling of the Operation of Radio Countermeasures Devices and Their Impact on the Information Transfer Process

The article describes a computer model of radio countermeasures devices. The results of modeling of the impact of organized interference on the process of information transfer.

Keywords: information transfer, radio communication circuit, radio countermeasures, jamming.

УДК 621.396.62

М. А. Бояршинов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: mabkb@istu.ru
А. А. Зыкин, магистрант
E-mail: soyp2013@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Методика моделирования радиолинии, использующей сигналы с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех

В статье приведена методика моделирования работы радиолинии, использующей сигналы с ППРЧ, в условиях воздействия преднамеренных помех.

Ключевые слова: радиолиния, преднамеренные помехи, радиоэлектронная борьба, моделирование, ППРЧ.

Введение

В настоящее время растут требования к средствам радиосвязи (СРС), в частности, требования достоверной и надежной доставки ин-

© Бояршинов М. А., Зыкин А. А., 2018

формации. На всех этапах существования и развития информационных систем, их функционирование протекало в конфликтных условиях. Наиболее сильно и наглядно конфликтное взаимодействие проявляется в противостоянии средств радиоэлектронного подавления (РЭП) и СРС. Средства РЭП бурно развиваются. Специфичность форм и методов проявления информационного конфликта позволяет в последнее время говорить об «информационной борьбе», «информационном оружии» и об «информационных войнах» как о дальнейшем естественном развитии и трансформации методов и способов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [1].

Использование сигналов с расширенным спектром в СРС обеспечивает надежную связь в условиях воздействия организованных помех и естественных шумов. Одним из таких сигналов является сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). В сигналах с ППРЧ расширение спектра достигается скачкообразным изменением несущей частоты в относительно широкой полосе, которая выделяется для работы СРС [2].

Описание компьютерной модели

В работе представлена компьютерная модель радиолинии, использующая сигналы с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех. В качестве примера рассмотрен сигнал с двоичной фазовой модуляцией (ФМ-2) с ППРЧ. Модель разработана в среде моделирования SIMULINK. При моделировании использовалось масштабирование полосы частот сигналов. В качестве примера приведены численные значения параметров, которые использовались авторами при моделировании. На рис. 1 представлена блок-схема компьютерной модели радиолинии.

Блок-схема радиолинии собрана с помощью стандартных блоков, входящих в SIMULINK: Bernoulli Binary Generator; Random Integer Generator; Zero-order; Discrete-Time VCO; Gain; Constant; Raised Cosine Transmit Filter; AWGN Channel; Raised Cosine Receive; Compare to Zero; Data Type Conversion; Error Rate Calculation; Display; Product; Sine Wave; Delay; Random Number; Digital Filter Design [3].

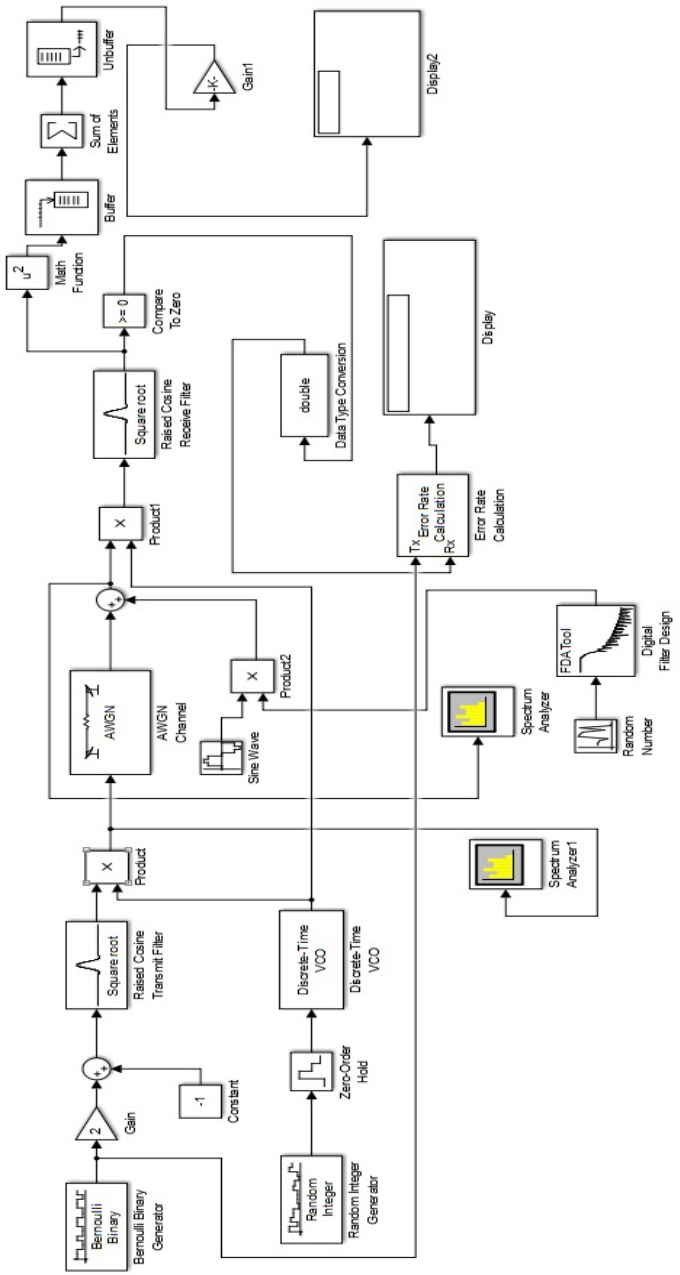


Рис. 1. Блок-схема компьютерной модели радиолинии

Формирование сигнала ФМ-2

Сигнал ФМ-2 формируется с помощью следующих блоков: *Bernoulli Binary Generator, Gain, Constant, Sum, Raised Cosine Transmit Filter*. Блок-схема формирования сигнала ФМ-2 представлена на рис. 2.

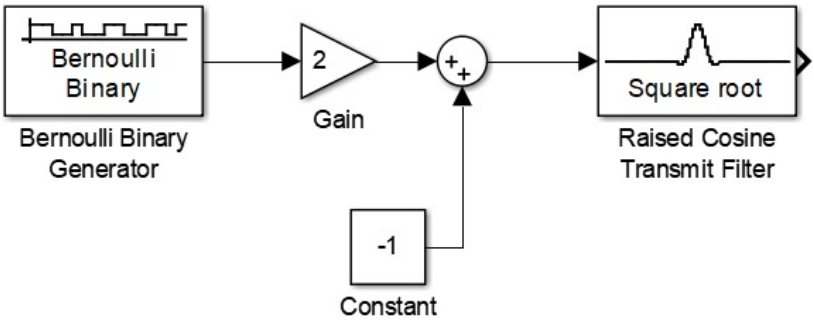


Рис. 2. Блок-схема формирования сигнала ФМ-2

В блоке генератора случайного двоичного числа Бернулли (Bernoulli Binary Generator) задаем следующие значения параметров: вероятность появления нуля (Probability of a zero) равным 0,5, время выборки (Sample time) равным 1/2400 = 0,42 мс, а также выбираем тип выходных данных (Output data type) – двоичный (double).

В блоке константы (Constant) выставляем значение постоянной (Constant value) равное –1.

В блоке усилителя (Gain) выставляем значение усиления равное 2. В усилителе сигнал усиливается по амплитуде. С выхода усилителя усиленный по амплитуде сигнал поступает на один из входов сумматора (SUM), где производится сложение сигнала с выхода усилителя с константой –1. С выхода сумматора однополярный сигнал преобразуется в биполярный сигнал с амплитудой [+1;–1] и нулевым средним.

В блоке формирующего фильтра «корень из приподнятого косинуса» (Raised Cosine Transmit Filter) задаем следующие значения параметров: значение коэффициента сглаживания (Rolloff factor) составляет 1, значение выходной выборки на символ (Output samples per symbol) составляет 80, обработка входной информации (Input processing) – Elements as channels (sample based). На выходе фильтра биполярный сигнал преобразуется в сигнал ФМ-2.

Формирование ППРЧ

Псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) реализуется в компьютерной модели с помощью блоков: *Random Integer Generator, Zero-Order Hold, Discrete-Time VCO*. Для того чтобы обеспечить синхронизации передатчика и приемника, необходимо сформировать идентичный генератор ППРЧ и в приемнике. На рис. 3. представлена блок-схема формирования сигнала с ППРЧ.

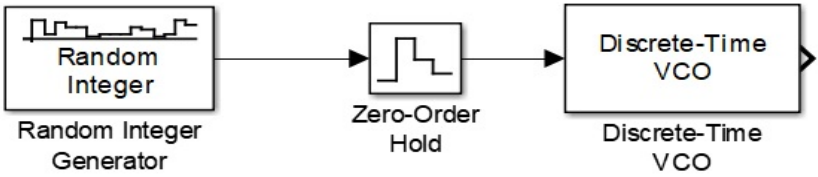


Рис. 3. Блок-схема формирования сигнала с ППРЧ

В генераторе случайных равномерно распределенных целых чисел (Random Integer Generator) задаем следующие значения параметров*:* значение М-арного числа (*M-ary Number* – длина диапазона случайных равномерно распределенных целых чисел [0, М-1]) равным 40, время выборки (Sample time) равным 1/20 = 50 мс, тип выходных данных (Output data type) – двоичные (double).

В блоке экстраполятора нулевого порядка (Zero-Order Hold) задаем время выборки (Sample time) равным $1/(2400 \cdot 80) = 5{,}2$ мкс.

В блоке генератора дискретного времени управляемый напряжением (Discrete-Time VCO) задаем следующие значения параметров: значение собственной частоты (Quiescent frequency) равным 2000 Гц, значение чувствительности по входу (Input sensitivity) равным 2000 Гц/В и время выборки (Sample time) равным $1/(2400 \cdot 80) = 5{,}2$ мкс.

Для того чтобы сформировать сигнал ФМ-2 с ППРЧ необходимо произвести умножение сформированного сигнала ФМ-2 на сигнал ППРЧ с помощью блока умножение (Product).

Канал аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ)

Далее сформированный сигнал ФМ-2 с ППРЧ поступает на *блок канал АБГШ (AWGN Channel)*, где сигнал подвергается воздействию естественных шумов. В блоке AWGN Channel задаются следующие значения параметров: величина отношения сигнал/шум (E_b/N_0) меняется от 0 до 10 дБ, количество бит на символ (Number of bits per symbol) составляет 1, входная мощность сигнала относительно 1 Ом

(Input signal power, referenced to 1 ohm) составляет 0,012 Вт, период символов (Symbol period) равный 1/(2400·80) = 5,2 мкс. Канал с АБГШ предназначен для создания мешающего воздействия в канале передачи информации. Он характеризуется равномерной спектральной плотностью, нормальным распределением значений амплитуд и аддитивным способом воздействия на сигнал.

Формирование преднамеренных помех

После прохождения сигнала через канал АБГШ он повергается воздействию преднамеренных помех (заградительных или прицельных).

Заградительная помеха формируется с помощью следующих блоков: *генератор дискретного сигнала*, значения которого являются случайной величиной распределенной по нормальному закону (Random Number) и *блока для проектирования цифрового фильтра* (Digital Filter Design). В блоке Random Number задаем время выборки (Sample time) равным 1/(2400·80) = 5,2 мкс. Величины дисперсии (Variance) влияет на мощность заградительной помехи. Чем больше величина дисперсии, тем больше мощность у преднамеренной помехи. В блоке для проектирования цифрового фильтра задаем следующие значения параметров: тип фильтра (Response type) – нижних частот (Low-pass), метод построения (Design method) – КИХ фильтр (FIR), частота среза фильтра $F_c = 96000$ кГц, частота задержания фильтра $F_s = 192000$ кГц, весовое окно фильтра (Windows) – Ханна, порядок фильтра (Specify order) составляет 40. Сформированная помеха поступает на один с входов блока суммирования Sum.

Прицельная помеха формируется с помощью следующих блоков: *Random Number, Digital Filter Design, Product2, Sine Wave.* Полоса прицельной помехи задается с помощью блока Digital Filter Design. При этом в данном блоке задаются следующие значения параметров: тип фильтра (Response type) – нижних частот (Low-pass), метод построения (Design method) – КИХ фильтр (FIR), частота среза фильтра $F_c = 10000$ кГц, частота задержания фильтра $F_s = 192000$ кГц, весовое окно фильтра (Windows) – Ханна, порядок фильтра (Specify order) составляет 40. С помощью генератора гармонических сигналов (Sine Wave) формируется гармонический сигнал с частотой 48 кГц, время выборки (Sample time) равным 1/(2400·80) = 5,2 мкс и амплитудой 1. При умножении сигнала помехи с гармоническим сигналом можно произвести перенести спектр помехового сигнала с нулевой частоты

на необходимую частоту для подавления полезного сигнала радиолинии. Также как и в случае с заградительной помехой, сформированная прицельная помеха поступает на один из входов блока суммирования Sum.

Прием и обработка сигнала

Смесь сигналов ФМ-2 с ППРЧ и сигнала преднамеренной помехи поступают на вход *приемного согласующего фильтра «корень из приподнятого косинуса» (Raised Cosine Receive Filter)*. Данный фильтр необходим для минимизации искажений входного сигнала. В данном блоке задаются следующие значения параметров: значение коэффициента сглаживания (Rolloff factor) составляет 1, значение входной выборки на символ (Intput samples per symbol) составляет 80, обработка входной информации (Input processing) – Elements as channels (sample based), коэффициент децимации (Decimation factor) составляет 80.

Далее сигнал с выхода фильтра поступает на вход блока *сравнения с нулем (Compare To Zero)*, где сигнал преобразуется из биполярного сигнала в однополярный сигнал с амплитудой от 0 до 1. В блоке *Compare* To Zero выбираем оператор (Operator) «>=».

С выхода блока сравнением с нулем сигнал поступает на вход *преобразователь входных данных в двоичные данные (Data Type Conversion)*. В данном блоке вбираем тип выходных данных (Output data type) двоичные данные (double). Далее отчеты поступает на одни из входов блока *расчета коэффициента ошибок (Error Rate Calculation)*. На другой вход блока расчета коэффициента ошибок поступает отчеты с выхода генератора случайных двоичных чисел Бернулли. Данный блок рассчитывает вероятность ошибки на бит, а также считает количество принятых отчетов без ошибок и количество принятых отчетов с ошибками. В блоке Error Rate Calculation выставляем значение задержки приема (Receive delay) раной 10, выходные данные (Output data) – Workspace.

Вероятность ошибки на бит, количество правильно принятых отчетов и количество неправильно принятых отчетов отображается в блоке *дисплей (Display)*.

Блоки *Math Function, Buffer, Sun of Elements, Unbuffer, Gain1, Display2* необходимы для индикации мощности полезного сигнала, а также мощности преднамеренных помех.

Выводы

Представленная компьютерная модель может быть использована для оценки помехоустойчивости при воздействии естественных шумов и преднамеренных помех на радиолинию, которая использует сигналы с ППРЧ.

Список литературы

1. Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.

2. *Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А.* Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

3. *Лазарев Ю. Ф.* MatLAB 6.5. Математическое моделирование физических процессов и технических систем: Учебный курс. – К.: 2004. – 474 с.

M. A. Boyarshinov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: mabkb@istu.ru
A. A. Zykin, magister student
E-mail: soyp2013@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Radio Communication Circuit Modeling Technique with FHSS Signals under the Impact of Intended Interference

The article presents the operation radio communication circuit modeling technique with FHSS signals under the impact of intended interference.

Keywords: radio communication circuit, intentional interference, electronic warfare, modeling, FHSS

УДК 621.396.93

М. А. Бояршинов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: mabkb@istu.ru
А. А. Зыкин, магистрант
E-mail: soyp2013@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Помехоустойчивость сигналов ФМ-2 с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех

В статье рассматривается радиолиния, использующая сигналы ФМ-2 с ППРЧ. Приведены результаты компьютерного моделирования ее работы в условиях воздействия преднамеренных помех.

Ключевые слова: преднамеренные помехи, ФМ-2 с ППРЧ, адаптация по частоте.

Введение

В настоящее время растут требования к средствам радиосвязи (СРС), в частности, к достоверной и надежной доставке информации. СРС часто работают в условиях информационного конфликта. Наиболее сильно и наглядно конфликтное взаимодействие проявляется в противостоянии средств радиоэлектронного подавления (РЭП), которые в настоящее время бурно развиваются, как и СРС [1].

Помехоустойчивость СРС

На СРС могут воздействовать как шумовые, так и преднамеренные, организованные помехи. Одним из способов обеспечения надежной связи в условиях воздействия организованных помех является применение сигналов с расширенным спектром. Одним из таких сигналов является сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). В сигналах с ППРЧ расширения спектра добиваются путем скачкообразного изменения несущей частоты в полосе, которая выделяется для работы СРС [2]. Для примера рассмотрен сигнал на базе двоичной фазовой модуляции.

Одним из важных параметров, который характеризует систему передачи информации и систему связи, является помехоустойчивость и помехозащищенность [3].

© Бояршинов М. А., Зыкин А. А., 2018

Для количественной оценки помехоустойчивости системы связи определяется вероятность ошибки на бит при заданном отношении сигнал/шум (ОСШ). При этом система считается более помехоустойчивой, если обеспечивается заданное качество связи при меньшем отношении сигнал/шум при прочих условиях.

Компьютерное моделирование радиолинии

Для оценки помехоустойчивости сигналов с ППРЧ проведено компьютерное моделирование радиолинии, в которой используется сигнал ФМ-2 с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех в среде моделирования SIMULINK. Для проведения оценки помехоустойчивости радиолинии, которая использует сигнал ФМ-2 с ППРЧ, использовалась компьютерная модель, предложенная авторами. Схема собрана с помощью стандартных блоков входящих в SIMULINK. Сигнал ФМ-2 формируется с помощью следующих блоков: Bernoulli Binary Generator, Gain, Constant, SUM, Raised Cosine Transmit Filter. Сигнал ППРЧ формируется с помощью блоков: Random Integer Generator, Zero-Order Hold, Discrete-Time VCO. Для синхронизации передатчика и приемника формируется идентичный генератор ППРЧ и в приемнике. Для формирования сигнала ФМ-2 с ППРЧ сигнал ФМ-2 умножают на сигнал ППРЧ с помощью блока Product. Блок Raised Cosine Receive Filter служит для демодуляции сигнала ФМ-2 с ППРЧ. Compare to Zero – блок сравнения с нулем. Data Type Conversion – блок преобразования входных данных в двоичные. Для расчета вероятности ошибки на бит используются следующие блоки: Error Rate Calculation, Display. Блоки Math Function, Buffer, Sun of Elements, Unbuffer, Gain1, Display1 необходимы для отображения мощности полезного сигнала, а также мощности преднамеренной помехи. Влияние естественных шумов обеспечивается с помощью блока AWGN Channel. При моделировании использовалось масштабирование полосы частот сигналов.

В результате компьютерного моделирования проведена сравнительная оценка помехоустойчивости при воздействии аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) на сигналы ФМ-2 и ФМ-2 с ППРЧ. Для проведения оценки помехоустойчивости в блоке канал АБГШ (AWGN Channel) менялось значение ОСШ (E_b/N_0) с шагом 1 дБ. В результате были получены вероятности ошибки на бит ($P_{ошб\ 1}$ – для сигнала ФМ-2, $P_{ошб\ 2}$ – для сигнала ФМ-2 с ППРЧ) от ОСШ. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Значение вероятности ошибки на бит при воздействии естественного шума на сигналы ФМ-2 и сигналы ФМ-2 с ППРЧ**

q, дБ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{ошб1}$, отн. ед.	7,5E-2	5,4E-2	3,6E-2	2,2E-2	1,3E-2	6E-3	2E-3	5E-4	2E-4	4E-5	2,8E-5
$P_{ошб2}$, отн. ед.	7,3E-2	5,2E-2	3,5E-2	2E-2	1,1E-2	5E-3	2E-3	5E-4	2E-4	4E-5	2,8E-5

На рис. 1 приведен график зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ для сигнала ФМ-2 и сигнала ФМ-2 с ППРЧ при воздействии АБГШ.

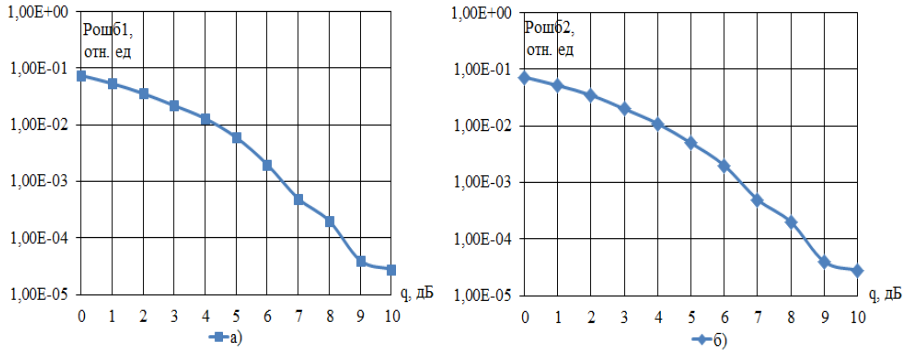


Рис. 1. График зависимости вероятности ошибки от ОСШ при воздействии АБГШ на сигнал ФМ-2 (*а*) и сигнал ФМ-2 с ППРЧ (*б*)

Так как АБГШ действует во всем частотном диапазоне, эффективность от применения ППРЧ не наблюдается. Как видно на рис. 1, помехоустойчивость сигналов ФМ-2 и ФМ-2 с ППРЧ совпадает, как и следовало ожидать.

Моделирование канала связи с ФМ-2 при воздействии заградительной помехи. Заградительная помеха в компьютерной модели реализуется с помощью следующих блоков: *Random Number, Digital Filter Design*. Полоса спектра сигнала ФМ-2 составляет $2 \cdot B_r = 2 \cdot 2400 = 4800$ Гц, где $B_r = 2400$ бит/сек – скорость передачи цифровой информации. На рис. 2 приведена спектрограмма сигнала ФМ-2 (слева) и спектрограмма сигнала ФМ-2 с ППРЧ (справа) при воздействии заградительных помех.

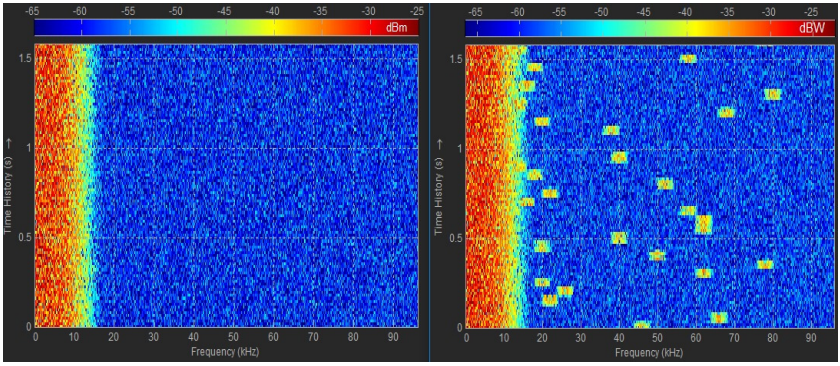


Рис. 2. Спектрограмма сигнала ФМ-2 (слева) и спектрограмма сигнала ФМ-2 с ППРЧ (справа) при воздействии заградительных помех

Как видно на рис. 2, заградительная помеха полностью подавила радиолинию, которая использует сигналы ФМ-2.

Далее исследовалась радиолиния, в которой используются сигнал ФМ-2 с ППРЧ. Сигнал ФМ-2 с ППРЧ позволяет бороться с помехами, которые занимают часть диапазона скачков, в том числе и с организованными помехами. При этом заградительная помеха уже будет относительно узкополосной для сигнала ФМ-2 с ППРЧ. Данная помеха подавила только узкую часть полосы сигнала и оказывает незначительное влияние на радиолинию, в отличие от радиолинии, где используются сигналы с фиксированной частотой.

Пусть на адаптивную радиолинию ФМ-2 с ППРЧ воздействует заградительная помеха полосой 96 кГц, когда полоса полезного сигнала составляет 80 кГц. При этом воздействие АБГШ на радиолинию не учитываем (ОСШ равно 50 дБ). При изменении мощности помехи производится оценка влияния помехи на радиолинии (помехозащищенность радиолинии ФМ-2 с ППРЧ). В качестве оценки влияния заградительной помехи на радиолинию измеряется вероятность ошибки на бит ($P_{ошб1}$) относительно отношения сигнал/помеха (ОСП). Полученные результаты приведены в табл. 2.

Прицельная помеха в компьютерной модели реализуется с помощью следующих блоков: *Random Number, Digital Filter Design, Sine Wave, Product2*. Частота среза КИХ фильтра составляет 10 кГц. Далее умножим помеховый сигнал на гармонический сигнал с частотой 48 кГц. Умножение сигналов приведет к тому, что получившийся сигнал

переносится с нулевой частоты на частоту, равную 48 кГц, а его полоса будет составлять 30 кГц.

Для оценки влияния прицельной помехи на радиолинию измеряется вероятность ошибки на бит ($P_{ошб2}$) относительно ОСП. Полученные результаты приведены в табл. 2.

ОСП изменяется путем уменьшения мощности помехи при фиксированном значении мощности сигнала ФМ-2 с ППРЧ.

Таблица 2. **Значение вероятности ошибки на бит при воздействии заградительной и прицельной помехи на адаптивную радиолинию ФМ-2 с ППРЧ**

q, дБ	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$P_{ошб1}$, отн. ед.	15,7E-2	11E-2	6E-2	3E-2	6E-3	2E-3	8,3E-5	1E-7	1E-8	1E-9	1E-11
$P_{ошб2}$, отн. ед.	9E-2	7E-2	5,4E-2	3,6E-2	2,2E-2	1,2E-2	5E-3	1E-3	8E-5	4E-5	8E-6

При фиксированной мощности сигнала ФМ-2 с ППРЧ при действии заградительной помехи шириной 96 кГц для обеспечения ОСП равной 12 дБ мощность помехи составляет 0,0015 Вт ($P_{ошб\ 2} = 8{,}3 \cdot 10^{-5}$ отн. ед.). Мощность прицельной помехи с фиксированной шириной 30 кГц составляет 0,016 Вт ($P_{ошб\ 1} = 0{,}005$ отн. ед.). Вероятность ошибки на бит при воздействии прицельной помехи превышает вероятность ошибки на бит при воздействии заградительной помехи примерно в 60 раза.

На рис. 3 приведен график зависимости вероятности ошибки на бит от ОСП для адаптивной радиолинии ФМ-2 с ППРЧ при действии заградительной прицельной помехи.

Как видно на рис. 3, при использовании сигнала ФМ-2 с ППРЧ эффективность прицельной помехи, поражающей оптимальную часть полосы частот, значительно превышает эффективность помехи той же мощности, поражающей всю полосу частот, занимаемую спектром сигнала ФМ-2 с ППРЧ. С увеличением ОСП разница между вероятностью ошибки на бит относительно прицельной и заградительной помехи увеличивается в разы.

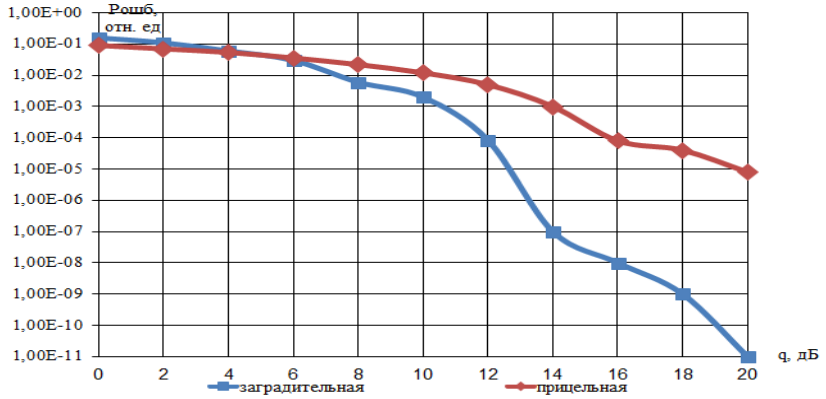


Рис. 3. График зависимости вероятности ошибки на бит от ОСП при воздействии заградительной и прицельной помехи на адаптивную радиолинию ФМ-2 с ППРЧ

Выводы

Из вышесказанного следует, что сигналы с ППРЧ обеспечивают надежную связь в условиях воздействия преднамеренных помех и шумов, а также обеспечивают скрытность сигналов. Так, с помощью сигналов с ППРЧ обеспечивается расширение ширины полосы спектра сигнала. Постановщику помех неизвестно, в каком диапазоне происходят скачки частоты, при этом ему приходится распределять спектральную плотность мощности по всему частотному диапазону, который будет, вероятно, занят спектром полезного сигнала. Значение спектральной плотности помехи с расширением полосы помехи уменьшается. Системы РЭП обладают ограниченной мощностью, которая может оказаться большей, но сопоставимой с мощностью полезного сигнала. Именно поэтому использование сигналов с ППРЧ представляет интерес как средство борьбы с помехами.

Исследования показали, что применение сигналов ФМ-2 с ППРЧ обеспечивает эффективную защиту к воздействию преднамеренных помех. На основании исследования можно говорить, что использование сигналов с ППРЧ во многих случаях позволит обеспечивать устойчивость радиостанций к воздействию преднамеренных помех.

Список литературы

1. *Куприянов, А. И.* Радиоэлектронная борьба. Основы теории / А. И. Куприянов, Л. Н. Шустов. – М. : Вузов. книга, 2011. – 800 с.
2. *Макаренко, С. И.* Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : монография / С. И. Макаренко, М. С. Иванов, С. А. Попов. – СПб. : Свое изд-во, 2013. – 166 с.
3. *Волков, Л. Н.* Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики : учеб. пособие / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 392 с.

M. A. Boyarshinov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: mabkb@istu.ru
A. A. Zykin, magister student
E-mail: soyp2013@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Antijamming Ability of BPSK with FHSS Signals under the Impact of Intended Interference

The article deals with radio communication circuit BPSK with FHSS signals. The quoted result computer modeling radio communication circuit BPSK with FHSS signals under the impact of intended interference.

Keywords: intended interference, BPSK with FHSS, frequency adaptation.

УДК 621.396

Р. Ф. Гумиров, студент
E-mail: nimruzilx@ya.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Конфигурирование SDR с помощью GNU Radio

Рассматривается вопрос программного конфигурирования SDR с помощью инструментария GNU Radio. В качестве эксперимента выполнена конфигурация отладочных плат ZedBoard Zynq-7000 и AD-FMCOMMS2-EBZ с использованием GNU Radio. Описана работа потокового графа проекта, а также содержимое спектров сигнала, полученных в ходе работы.

© Гумиров Р. Ф., 2018

Ключевые слова: SDR; GNU Radio, конфигурирование, потоковый граф, сигнал, спектр, частота.

Введение

В связи с увеличением различных методов, стандартов и средств беспроводной передачи данных в истории техники появилась концепция программно определяемого радио, создателем которой является Джозеф Митола, описавший свою идею в 1990 г. [1]. Программно определяемое радио (software-defined radio, SDR) – устройство приема и (или) передачи данных, в котором отдельные или все функции физического уровня являются программно-конфигурируемыми. Иными словами, при реализации SDR используется технология, которая в конечном итоге позволяет конфигурировать рабочие параметры с помощью программного обеспечения. Благодаря такой гибкой перенастройке устройства один трансивер может быть приспособлен под множество различных форм сигнала, которые можно добавить программно в процессе работы. Концепция SDR приводит к тому, что некоторые аппаратные элементы, которые составляют радиотракт, становятся отчасти не нужны, поскольку некоторые функции можно реализовать программно. Что касательно применения, то в настоящее время SDR широко применяются в военной сфере и сфере беспроводных услуг как сотовая связь, где в режиме реального времени требуется поддержка разнообразных изменяющихся радиопротоколов.

При разработке такой радиосистемы может возникнуть вопрос: с помощью чего конфигурировать SDR, какой инструмент упростит задачу, избавив от затрат времени на изучение сложных САПР и языков программирования? Ответом на вопрос является GNU Radio.

GNU Radio – это программный инструментарий, который предоставляет разработчикам программно определяемых радиосистем библиотеку блоков, обеспечивающих основные функции цифровой обработки сигналов, для конфигурации своей радиосистемы под определенные нужды. Процесс сборки выполняется в графическом интерфейсе GNU Radio Companion, где библиотечные блоки соединяют друг с другом, образуя потоковый граф, который определяет процессы цифровой обработки. При завершении создания граф преобразуется в код на языке python, который впоследствии можно доработать, если это необходимо.

Описание эксперимента

В качестве примера конфигурации SDR с помощью GNU Radio используем связку отладочных плат ZedBoard Zynq-7000 и AD-FMCOMMS2-EBZ. Плата Zedboard выступает в качестве системы цифровой обработки, она содержит все необходимое для создания проектов на основе операционной системы Linux, на которую преимущественно ориентировано GNU Radio. В свою очередь AD-FMCOMMS2-EBZ представляет собой приемопередатчик с возможностью программной конфигурации как в широком диапазоне частот, так и в узком. Данная отладочная плата выполнена на базе конфигурируемого трансивера AD9361, структурная схема которого представлена на рис. 1.

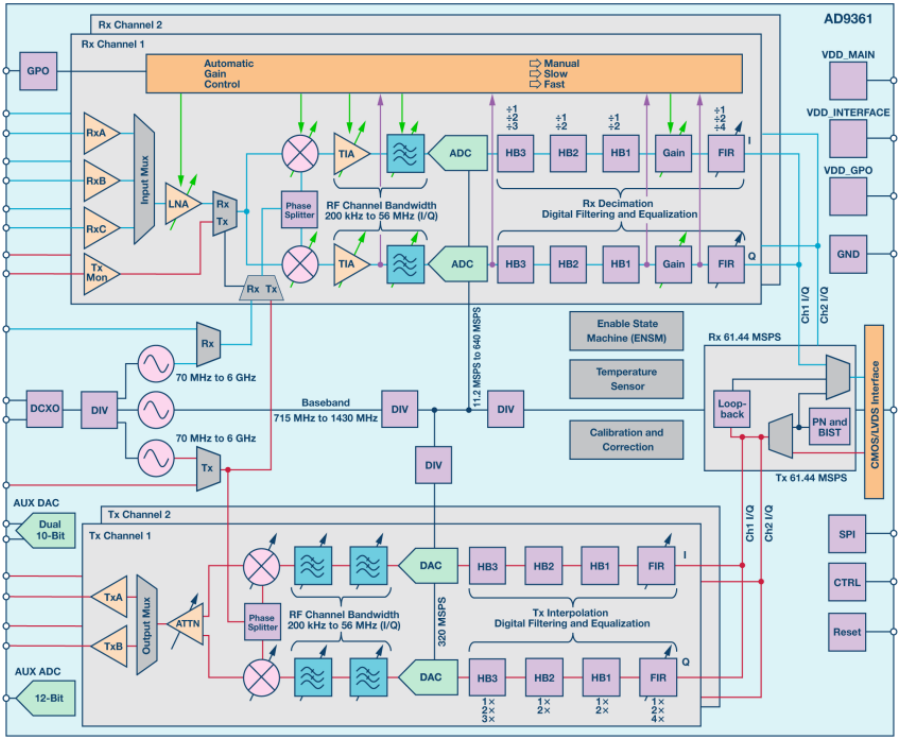


Рис. 1. Структурная схема AD9361

AD9361 представляет собой приемопередатчик прямого преобразования частоты с квадратурным представлением сигнала [2]. Каналы приема содержат три малошумящих усилителя, гетеродин с настройкой частоты от 70 МГц до 6 ГГц, смесители, усилители квадратурных сигналов, аналоговые и цифровые фильтры и два 12-разрядных АЦП с регулируемой частотой дискретизации (с возможностью выполнения децимации/интерполяции). Передающий тракт также включает в себя все необходимые блоки для реализации архитектуры прямого преобразования частоты. Полоса пропускания каналов может быть настроена в диапазоне от 200 кГц до 56 МГц.

Познакомившись с аппаратной частью, перейдем к проекту в GNU Radio. Вся работа проводилась на отладочной плате Zedboard в операционной системе Linux, поставляемой вместе с платой на SD-карточке с предустановленным GNU Radio и необходимыми библиотеками. В качестве задачи был осуществлен приема сигнала на FM-диапазоне, для этого был построен граф следующего вида (рис. 2). Как видно из рисунка, каждый блок имеет свои параметры настройки.

В данном графе блок FMCOMMS-2/3/4 является источником сигнала, который представляет собой графически трансивер AD9361 и отвечает за его конфигурацию. Все операции, производимые после этого блока, выполняются на ПЛИС Zynq-7000. FMCOMMS-2/3/4 выдает синфазную I и квадратурную Q составляющие в формате short (16-разрядного короткого целочисленного потока), которые необходимо перевести в комплексный вид, осуществляется это действие с помощью двух блоков: short to float, преобразующий 16-разрядный короткий целочисленный поток в поток с плавающей запятой (реальный), и float to complex, преобразующий поток с плавающей запятой в комплексный вид. Далее сигнал фильтруется с помощью фильтра низких частот, чтобы выделить полезный для нас сигнал. Для этого используется блок Low Pass Filter. После фильтрации проводится демодуляция, т. е. перевод комплексного сигнала в аудиосигнал. Выполняется это с помощью блока WBFM Receive. Поскольку с выхода предыдущего блока мы имеем аудиосигнал, то следующим блоком является Wav File Sink, записывающий аудиосигнал в файл формата wav. Получившийся файл можно воспроизводить в GNU Radio с помощью блока Wav File Source или в любом другом проигрывателе, работающем с wav-файлами.

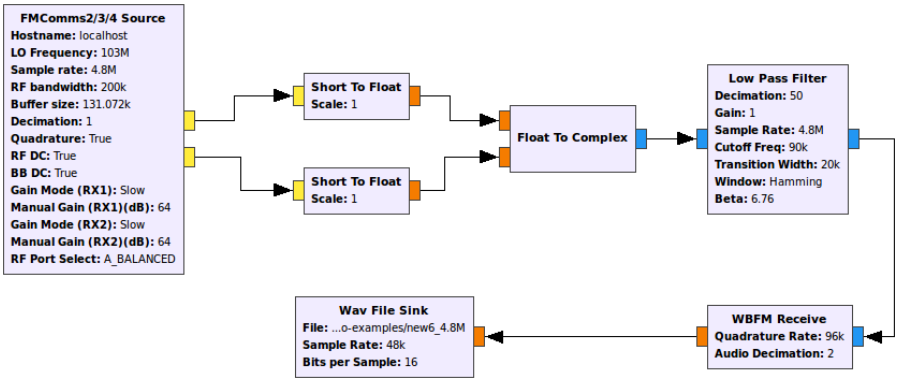


Рис. 2. Потоковый граф в GNU Radio

В процессе обработки можно осуществлять графический вывод спектра получаемого сигнала. Для этого используется блок WX GUI FFT Sink, осуществляющий вывод спектра, и Throttle, ограничивающий частоту дискретизации, чтобы не возникло поглощения ресурсов процессора. Используя граф, представленный на рис. 3, можно получить спектр на выходе трансивера AD9361, представленный на рис. 4, а также спектр FM-станции, представленный на рис. 5, если провести соединение в графе не напрямую, а через фильтр низких частот и демодулятор.

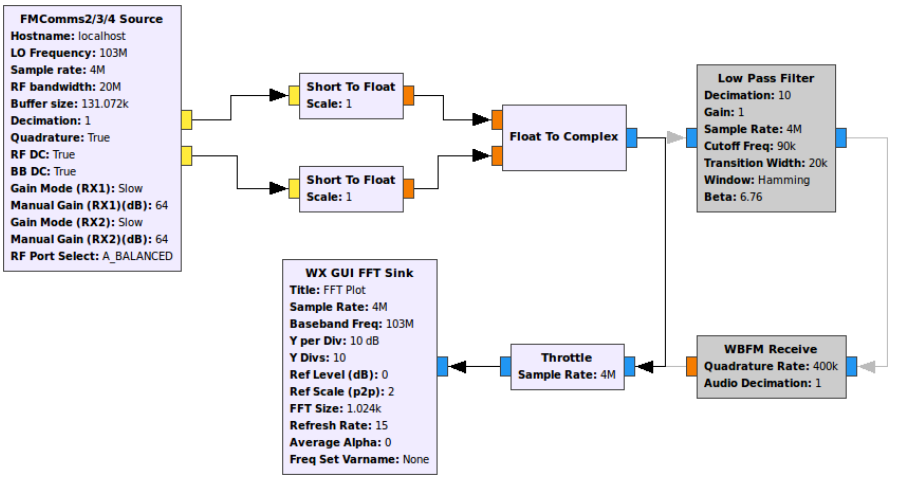


Рис. 3. Потоковый граф для вывода спектра с трансивера AD9361

Результаты и их обсуждение

Как мы видим, на выходе трансивера AD9361 получается спектр, на котором наблюдается несколько больших пиков – это отдельные радиостанции. В нашем случае мы настроены на 103 МГц, поэтому она отображается по центру.

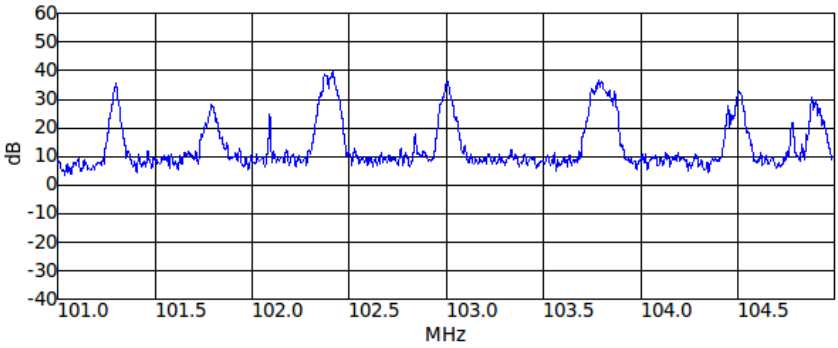


Рис. 4. Спектр сигнала на выходе трансивера AD9361

На выходе демодулятора можно наблюдать спектр с составляющими, соответствующий современной FM-станции [3].

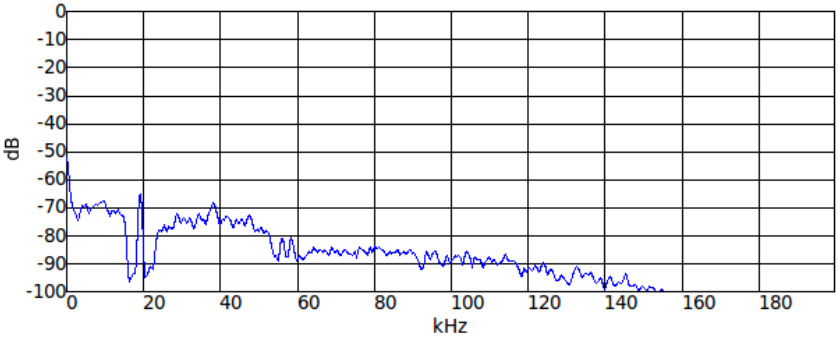


Рис. 5. Спектр FM-станции

Среди составляющих спектра можно увидеть 4 основных компонента, расположенных слева направо:

1) звук в формате «моно» (L+R) от 30 Гц до 15 кГц;

2) пилот-тон 19 кГц, используемый для декодирования стереосигнала, для чего частота пилот-тона умножается на 2, и относительно полученной частоты 38 кГц разделяются стереоканалы;

3) стереозвук, второй канал (L-R), находящийся симметрично относительно 38 кГц;

4) RDS (Radio Data System) – канал передачи информационных сообщений по каналам ЧМ-радиовещания в диапазоне УКВ, который передается на 3й гармонике пилот-тона, его частота составляет соответственно 57 кГц.

Вывод

Конфигурирование SDR может стать для разработчика сложной задачей, которая требует времени для освоения и разработки программной части. GNU Radio может помочь сократить время при настройке подобной радиосистемы, избавляя разработчика от покупки САПР, их изучения, а также трудоемкой разработки топологии ПЛИС. Поддержку библиотеки блоков GNU Radio обеспечивают такие производители элементной базы для сборки SDR, как Xilinx и Analog Device. Количество подобных производителей растет, но не так быстро, поэтому в данном выборе необходимо учитывать поддержку и связь производителей компонентной базы с GNU Radio. Если в GNU Radio не будет необходимых блоков, то их разработкой можно заняться лично, поскольку такая возможность обеспечена разработчиками GNU Radio.

Список литературы

1. *Frank Schulze*. Software-Defined Radio // Seminar Technische Informatik - Progress in Systems and Protocols. – URL: http://www.amateurfunk-wiki.de/images/4/4e/Schulze07softwaredefinedradio.pdf (дата обращения: 01.112017).

2. *Di Pu, Andrei Cozma,* and *Tom Hill*. Four Quick Steps to Production: Using Model-Based Design for Software-Defined Radio (Part 1) // Analog Dialogue. – URL:http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/using-model-based-design-sdr-1.html (дата обращения: 05.11.2017).

3. Bandwidth and other technical matters in FM broadcasting// Axino-tech Consulting & Services – URL: http://www.axino-tech.co.nz/documents/ Bandwidth%20needed%20for%20FM%20broadcasts.html (дата обращения: 08.11.2017).

4. Четыре быстрых шага на пути к производству. Модельно-ориентированное проектирование программно определяемых радиосистем. Ч. 4. Бы-

строе макетирование при помощи комплекта Zynq SDR Kit и автоматических средств генерации кода из Simulink / М. Донован [и др.] // Компоненты и технологии . – 2016. – № 9 (182) . – С. 97–102.

R. F. Gumirov, student
E-mail: nimruzilx@ya.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Configuring SDR with GNU Radio

The question of software configuration of SDR using the GNU Radio toolkit is being considered. As an experiment, the configuration of the ZedBoard Zynq-7000 and AD-FMCOMMS2-EBZ debugging boards using GNU Radio was performed. The work of the flow graph of the project, as well as the content of the signal spectrum obtained during the work, are described.

Keywords: SDR, GNU Radio, configuration, flow graph, signal, spectrum, frequency.

УДК 621.391.1

Н. А. Деришева, студент
А. И. Нистюк, д-р техн. наук, проф.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Интерфейсы телекоммуникационных устройств повышенной надежности

Данная статья посвящена некоторым видам интерфейсов телекоммуникационных устройств, имеющих повышенную надежность. В частности, рассматриваются вопросы о возможностях тактильных ощущений от устройства к пользователю и распознавания объемного изображения с поверхности сенсорных экранов телекоммуникационных устройств. Также предлагается к рассмотрению специальное устройство, позволяющее организовать для обычного смартфона тактильную обратную связь.

Ключевые слова: интерфейсы телекоммуникационных устройств, сенсорные экраны, тактильные ощущения, подставка под смартфон.

© Деришева Н. А., Нистюк А. И., 2018

Введение

В современном мире телекоммуникационные устройства занимают неотъемлемое место в жизни каждого человека. В частности, огромную популярность приобрели устройства с сенсорными панелями: смартфоны, планшеты, часы и т. д. Из истории сенсорных дисплеев известно, что первый дисплей был разработан в 1971 г. Сэмом Херстом – сотрудником Университета Кентукки. Он сконструировал сенсорную панель, которая запатентована под названием «илограф» [1]. С этого момента и начались разработки различных сенсорных экранов. Изначально сенсорные экраны применялись в конструкции карманных персональных компьютеров (КПК, PDA), теперь первенство держат коммуникаторы, мобильные телефоны, плееры и даже фото- и видеокамеры. Однако технология управления пальцем через виртуальные кнопки на экране оказалась настолько удобной, что ею оснащаются почти все платежные терминалы, многие современные банкоматы, электронные справочные киоски и другие устройства, используемые в общественных местах.

Сведения из теории

На сегодняшний день известно о четырех базовых принципах создания сенсорных экранов: резистивный, емкостной, инфракрасный и акустический.

Резистивный принцип – устаревшая технология относительно других. Его конструктив имеет структуру: между двух пленок, сделанных из проводящего материала, накладывается тонкий слой диэлектрика (рис. 1).

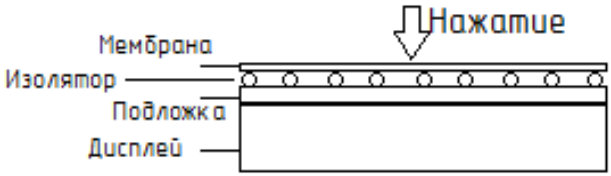


Рис. 1. Визуальный принцип работы резистивного экрана

При касании экрана продавливается зазор, и пленки контактируют. Координата касания определяется с помощью электродов, нанесенных на каждую пленку (слева, справа на одной и сверху, снизу на другой) (рис. 2).

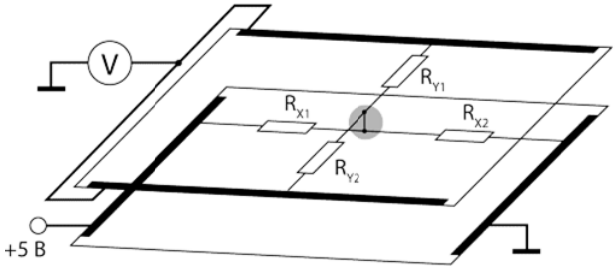


Рис. 2. Принцип работы резистивного экрана

Так как сопротивление пленки довольно большое, то образуются четыре перпендикулярных резистора (R_{x1}, R_{x2}, R_{y1}, R_{y2}), висящих друг над другом. В точке касания они замыкаются между собой, и рассчитывается ее координата [2]. Данная технология имеет достоинства, такие как простота построения, максимальная стойкость к загрязнению и невысокая стоимость. К недостаткам можно отнести: недолговечность, недостаточную прочность, отсутствие технологии мультитач.

Принцип емкостного сенсорного экрана основан на нанесении резистивного материала сеткой или сегментами на пластиковую или стеклянную панель. По углам экрана ставят электроды, которые подают постоянный ток на всю панель. Также по краям находятся датчики, которые регистрируют утечки токов при касании экрана в какой-либо точке (рис. 3). Датчики рассчитывают точку касания, при этом чем ближе к месту утечки, тем больше ток утечки [3]. Данный принцип предназначен как для работы с пальцем человека, так и со специальными стилусами.

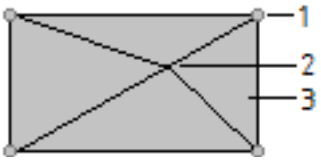


Рис. 3. Принцип работы емкостного сенсорного экрана:
1 – электрод; *2* – точка касания; *3* – экран

Достоинства данных экранов заключаются в надежности, влагостойкости, устойчивости к загрязнениям и наличии технологии мультитач. Недостатки данной системы заключаются в отсутствии воз-

можности прикосновений в перчатке и потере чувствительности в холодную погоду.

Инфракрасный принцип имеет множество решений, из которых самым популярным является инфракрасный (ИК) сенсор на основе неподвижных пар. Подобные сенсоры применяются преимущественно в дисплейных панелях с большим размером экрана. В модуле, обрамляющем экран, с двух сторон расположены линейки ИК-светодиодов с фокусирующими линзами, а на противоположных сторонах – линейки фотодиодов либо фототранзисторов (рис. 4).

При включении светодиодов над поверхностью экрана формируется невидимая сетка, образованная ИК-лучами. Когда какой-либо предмет приближается к поверхности экрана, он перекрывает пересекающиеся в данной точке лучи. Отсутствие луча фиксируется светочувствительными элементами оптопар, по изменению состояния которых контроллер определяет координаты точки касания.

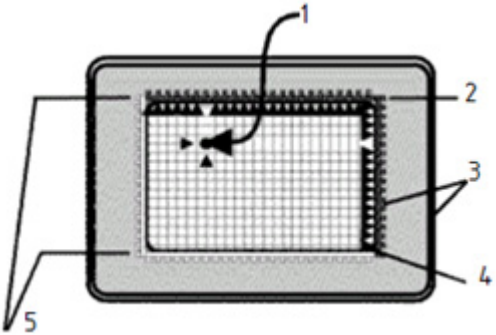


Рис. 4. Принцип работы инфракрасного сенсора с массивом неподвижных оптопар: *1* – прикосновение; *2* – рамка оптоматрицы; *3* – панель, скрывающая светодиоды; *4* – край активной области дисплея; *5* – сетка из ИК-лучей

Достоинствами экранов, использующих данную технологию, являются: высокая прозрачность экрана, долговечность и ремонтопригодность. Недостатки: использование только в чистых помещениях, т. к. сенсор боится грязи, не определяется сила нажатия, вычисление координат производится со средней точностью, а также высокая стоимость.

Суть работы сенсорной панели с определением поверхностно-акустических волн (ПАВ) заключается в наличии ультразвуковых колебаний в толще экрана. Сенсорная панель на базе ПАВ представляет собой стеклянную пластину, которая монтируется перед экраном дисплея.

В углах пластины установлены пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) и принимающие датчики, по краям – отражатели (рис. 5).

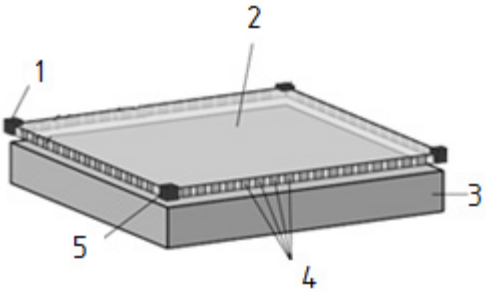


Рис. 5. Принцип работы сенсорной панели на базе технологии ПАВ: *1* – пьезоэлектрический преобразователь; *2* – стеклянная пластина; *3* – дисплей; *4* – отражатели; *5* – приемник

В процессе работы контроллер подает высокочастотный электрический сигнал на ПЭП, которые, в свою очередь, возбуждают в стеклянной пластине поверхностно-акустические волны ультразвукового диапазона. Эти волны равномерно распределяются отражателями по толще пластины и затем улавливаются принимающими датчиками, которые преобразуют их в электрический сигнал, считываемый контроллером. По изменению сигналов, считываемых принимающими датчиками, контроллер определяет координаты точки касания (рис. 5) [4].

Достоинствами системы являются высокая прозрачность, долговечность (до 50 млн касаний) и возможность определения не только координат касания, но и его силу. К недостаткам относят сбои в работе при воздействии акустических шумов, вибраций, загрязнения экрана, и низкую точность определения координат относительно емкостных экранов.

У всех описанных видов сенсорных экранов имеется общий недостаток – это отсутствие тактильных ощущений оператором, что делает их менее информативными. Данная технология тактильной связи начала развиваться относительно недавно. Создание тактильных ощущений все еще остается сложной задачей. В особенности сложным является симулирование прикосновений к мягким объектам, т. к. наши пальцы обладают высокой чувствительностью, передавая тонкие нюансы прикосновения, которые сложно подделать. Тактильные ощущения для сенсорных устройств создаются с помощью механических устройств, например актуатора, который предназначен специально для получения тактильного эффекта [5].

Описание устройства

На основе последней технологии (ПАВ) предлагается создать более компактное дополнительное устройство – подставка для коммуникационного устройства, которое будет иметь примерный вид, изображенный на рисунке 6.

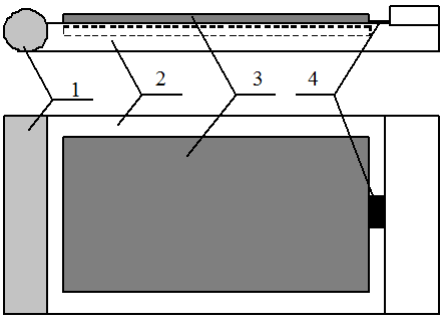


Рис. 6. Подставка под смартфон для организации тактильной связи с экраном: *1* – актуатор; *2* – корпус подставки; *3* – смартфон; *4* – электрический соединитель

Подставка выглядит как чехол для смартфона, только толще. Она имеет независимое собственное питание, мощный актуатор (устройство, воспроизводящее тактильную обратную связь телекоммуникационного устройства и пользователя), электрический соединитель подставки со смартфоном. С помощью актуатора осуществляется ответ на прикосновение посредством вибрации. Вся система подставки позволяет определять, помимо стандартных ощущений, также объем, фактуру изображения, отраженного на экране. То есть возникает эффект объемного изображения. Таким образом, с использование данной подставки практически любой смартфон превращается в телекоммуникационное устройство с обратной тактильной связью.

Вывод

В качестве вывода можно сказать, что сенсорные экраны, поддерживающие технологию тактильных ощущений, позволяют улучшить взаимодействие с пользователем, увеличить точность и надежность вводимых данных, улучшают надежность в получении информации, изображений с экрана. Таким образом, предложенная технология в целом повышает надежность систем передачи информации наряду с созданием помехоустойчивых кодов [8].

Список литературы

1. *Асмаков, С.* Многообразие сенсорных дисплеев [Электронный ресурс] // КомпьютерПресс. – URL: http://compress.ru/article.aspx?id=21556 (дата обращения: 04.11.2017).

2. DI HALT. Работа с резистивным сенсорным экраном [Электронный ресурс] // Easy electronics. Электроника для всех. – URL: http://easyelectronics.ru/rabota-s-rezistivnym-sensornym-ekranom.html (дата обращения: 05.11.2017).

3. *Терехов, И.* Как это работает: сенсорные экраны [Электронный ресурс] // Аргументы и факты. – URL: http://www.aif.ru/techno/pc/18050 (дата обращения: 05.11.2017).

4. *Мухин, И.* Сенсорные экраны: решение проблем. Ч. 3. Broadcasting // Телевидение и радиовещание. – 2006. – № 3. – С. 50–52.

5. *Кингсли-Джонс, С.* Сенсорный экран с тактильной обратной связью // Электронные компоненты. – 2008. – № 10. – С. 37–38.

6. *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 : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 364–368.

7. *Нистюк, А. И.* Технология тактильной обратной связи в устройствах с сенсорным экраном // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – № 3(7). – С. 66–68.

8. *Жидяев, А. В.* Разработка и исследование высокоэффективного каскадного помехоустойчивого кода с низкой плотностью проверок на четность / А. В. Жидяев, А. Н. Копысов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2014. – № 4 (64). – С. 114–117.

N. A. Derisheva, student
A. I. Nistyuk, DSc in engineering, professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Interfaces of Telecommunication Devices of Increased Reliability

This article is devoted to some types of interfaces of telecommunication devices having increased reliability. In particular, questions are discussed about the possibilities of tactile sensations from device to user and recognition of the volumetric image from the surface of touch screens of telecommunication devices. Also proposed for consideration is a special device that allows for a normal smartphone to organize tactile feedback.

Keywords: interfaces of telecommunication devices, touch screens, tactile sensations, stand for smartphone.

УДК 004.056.5

В. Н. Емельянов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: em.vl@mail.ru
М. М. Емельянова, ст. преподаватель
Email: em-mari@mail.ru
В. В. Титов, студент
E-mail: shumagorath@mail.ru
М. Ю. Шамонов, студент
E-mail: shmv.s.m.y@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Уязвимость механизма аутентификации в WPA2

В статье рассматривается новый вид атаки на современные беспроводные сети Wi-Fi, которые используют протокол WPA2. Приводится описание общей схемы работы протокола WPA2 и пример атаки на WPA2-AES как одного из самых защищенных протоколов. В заключение предлагаются методы противодействия данному типу атаки.

Ключевые слова: беспроводные сети, Wi-Fi, WPA, WPA2, несанкционированный доступ, точка доступа, Android, Linux, прошивка, шифрование, ключ.

Введение

Беспроводные сети используются повсеместно – в квартирах, офисах, образовательных и государственных учреждениях, парках и других общественных местах. Развертывание беспроводных сетей позволяет организовать подключение к сети Интернет в труднодоступных местах, что повышает мобильность и гибкость сети. Например, это обеспечивается с помощью мобильных самоорганизующихся сетей MANET путем применения протоколов маршрутизации [1] и в летающих самоорганизующихся сетях FANET [2–4]. Качество связи в таких сетях обеспечивается с помощью различных протоколов коррекции потерь данных как на канальном, так и на прикладном уровнях [5–7]. Однако защитить радиоканал от несанкционированного доступа, в отличие от медного или оптического, гораздо сложнее [8, 9].

© Емельянов В. Н., Емельянова М. М., Титов В. В., Шамонов М. Ю., 2018

Технология Wi-Fi, функционирующая на частотах 2,4 ГГц и 5 ГГц, является на данный момент одной из самых популярных беспроводных технологий локальных сетей. Протоколы шифрования Wi-Fi (такие как WEP, WPA, WPA2), применяемые для установления соединений клиента и точки доступа (ТД), в первую очередь нацелены на осуществление безопасной передачи трафика [8]. В отличие от WEP и WPA, протокол WPA2 использует более сложные алгоритмы шифрования, что уменьшает вероятность перехвата трафика и его распознавания. Ранее WPA2 не был скомпрометирован и не был подвержен атакам, за исключением прямого перебора.

Однако, несмотря на надежность и математически доказанную безопасность WPA2, была выявлена уязвимость механизма аутентификации [10]. Новый метод атаки злоумышленники могут использовать для чтения информации, которая ранее считалась безопасной и зашифрованной. В частности, злоумышленник может легко перехватить пакеты с конфиденциальной информацией, такой как номера кредитных карт, пароли или электронные письма. Более того, в некоторых случаях атака позволяет не только читать, но и модифицировать трафик (например, при использовании TKIP шифрования). Атака применима как к частным, так и к корпоративным беспроводным сетям Wi-Fi, использующим протокол WPA или WPA2.

Подробности атаки

В качестве примера рассмотрим атаку на WPA2 PSK AES, т. к. все остальные варианты реализации шифрования были тем или иным образом когда-то взломаны.

Разберем реализацию атаки на протокол WPA2 PSK с потоковым блочным AES шифрованием в режиме CCM, т. к. на данный момент он является стандартом по умолчанию при создании беспроводных сетей и считается наиболее надежным. Для реализации атаки на протокол WPA2 в первую очередь производится атака типа Channel based MITM (Man In The Middle). Данная атака предполагает внедрение в радиоканал между жертвой и ТД с последующей ретрансляцией всего трафика через атакующее устройство. В ходе данной атаки злоумышленник создает фиктивную ТД с тем же именем беспроводной сети, что и у настоящей ТД, но на другом канале. В то же время он создает помехи на канале, на котором действует оригинальная ТД, что приводит к отключению компьютера жертвы от настоящей ТД и переподключению к фиктивной. После этого генерация помех прекращается, и трафик начинает передаваться от жертвы к реальной ТД [10].

Реализация атаки начинается с перехвата пакетов четырехшагового рукопожатия (4-way handshake), используемого в механизме аутентификации WPA2. Принцип его работы представлен на рис. 1. Рукопожатие начинается с обмена случайными числами A-nonce со стороны ТД и S-nonce со стороны клиента, которые наряду с SSID, BSSID и паролем используются для формирования временного сессионного ключа. ТД и клиент формируют его независимо друг от друга, и в третьем сообщении рукопожатия ТД посылает запрос на установление этого ключа и должна получить подтверждение от клиента в четвертом сообщении. После завершения процесса аутентификации начинается передача шифрованного трафика.

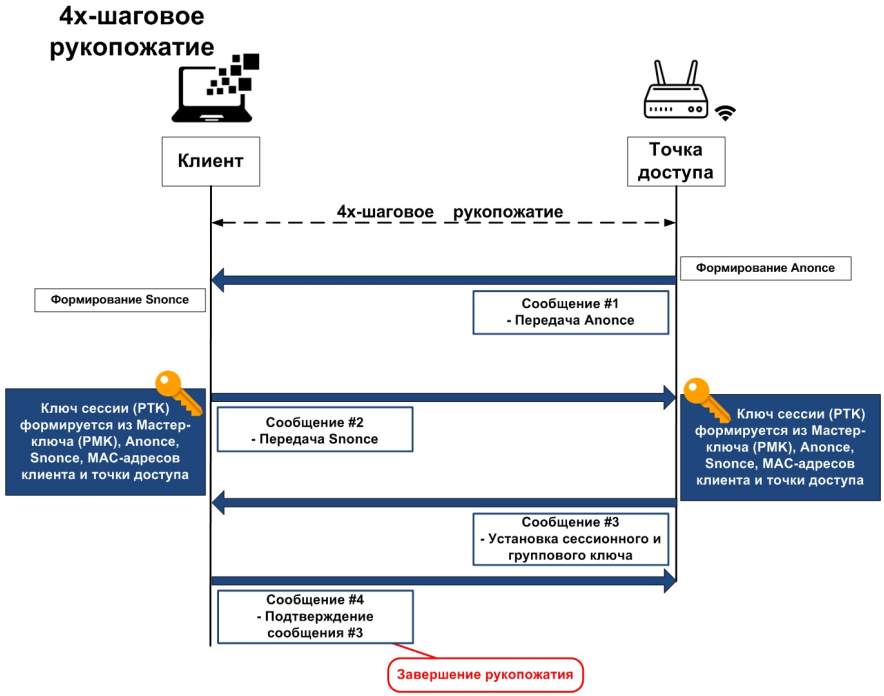


Рис. 1. Четырехстороннее рукопожатие

Принцип атаки заключается в блокировании четвертого сообщения рукопожатия, подтверждающего сессионный ключ (рис. 2). Поскольку клиент не знает, дошло подтверждение до ТД или нет, он начинает отправку полезного трафика. В свою очередь ТД, не получив сообще-

ния об успешном установлении ключа, посылает повторное сообщение установления того же самого ключа, что приводит к сбросу счетчика кадров в векторе инициализации связки AES-CCM [10,11].

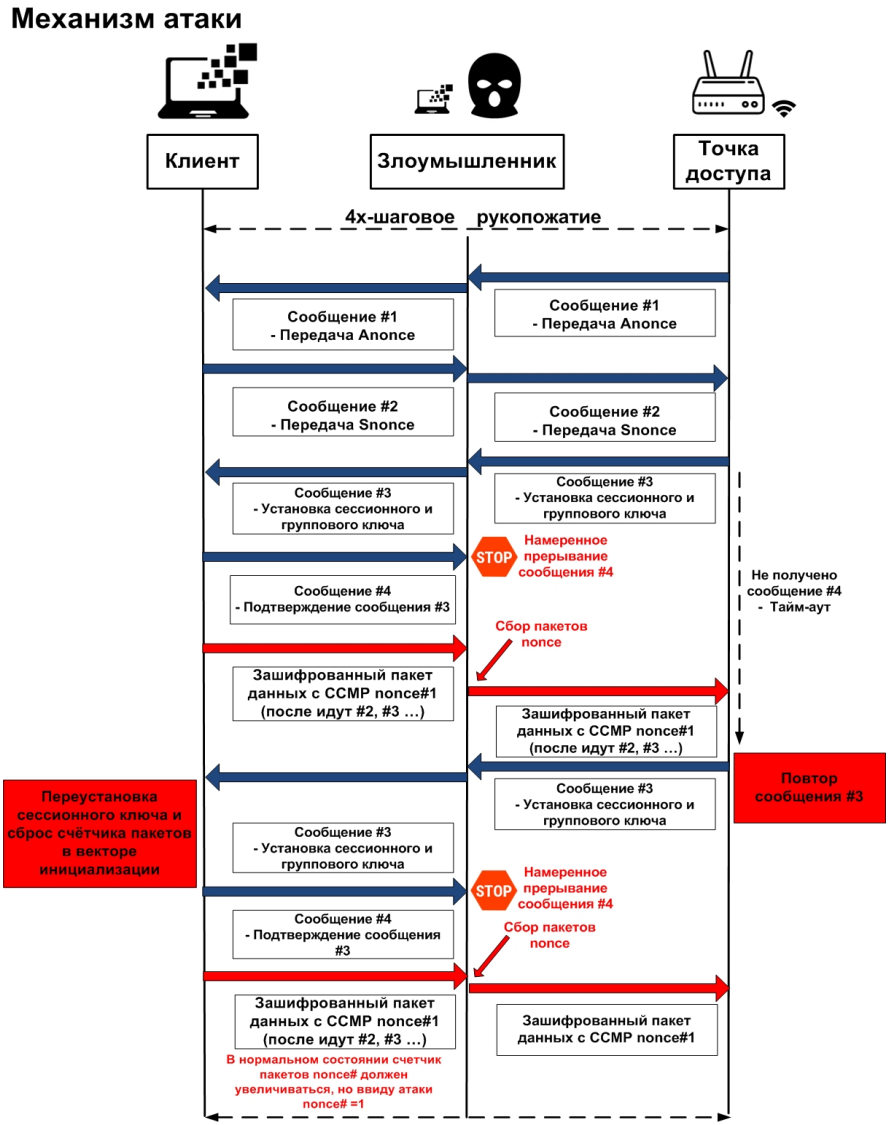


Рис. 2. Атака на четырехстороннее рукопожатие

В WPA2 шифрование AES-CCM выполняется следующим образом: к образованному ранее сессионному ключу добавляется вектор инициализации, в котором присутствует счетчик кадров и который должен быть уникален для каждого передаваемого кадра (рис. 3). Затем этот уникальный ключ блока с помощью операции XOR складывается с исходным кадром, в результате чего образуется зашифрованный пакет.

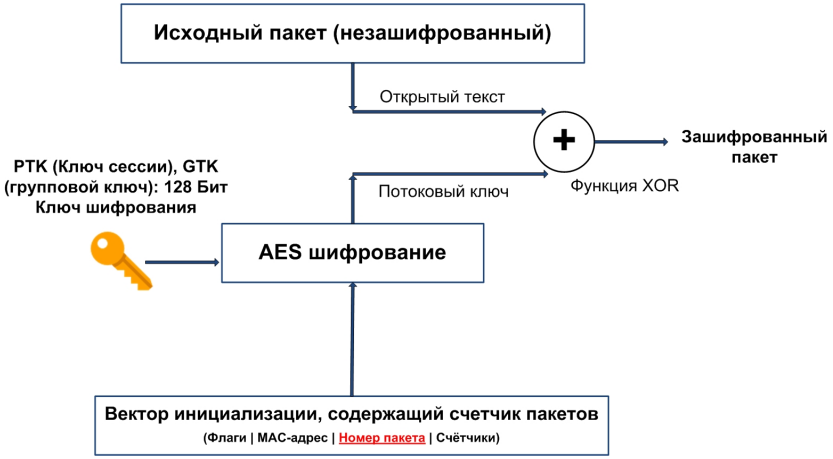


Рис. 3. Реализация шифрования AES-CCM в протоколе WPA2

В результате атаки вектор инициализации будет повторяться после каждой переустановки ключа. Собирая и анализируя пакеты с одинаковым ключом и вектором инициализации, становится возможным вычисление сессионного ключа, что позволит расшифровать весь передаваемый трафик.

Стоит также отметить, что данная атака эффективна и против BSS рукопожатия, применяемого для динамического переподключения клиента между ТД одной сети, и против группового ключа, установка которого происходит в третьем сообщении рукопожатия одновременно с ТД, используемого для рассылки широковещательных пакетов от ТД к клиентам.

Вариант атаки с установкой нулевого ключа

В ходе тестирования найденной уязвимости выяснилась особенность работы встроенного в Linux Wi-FI клиента WPA_SUPPLICANT версии 2.4 и выше. Особенность заключается в том, что в данном кли-

енте, согласно одной из поправок в стандарте 802.11, единожды установленный ключ стирается из памяти, вследствие чего при повторном запросе на установку ключа устанавливается ключ, содержащий все нули. На практике это означает, что огромное количество устройств на базе ОС Linux уязвимы для перехвата и модификации трафика. В частности, это компьютеры и ноутбуки, работающие под управлением Linux и использующие WPA_SUPPLICANT версии 2.4 и выше, а также смартфоны с ОС Android 6.0 и старше (Marshmallow, Nougat и Oreo). Согласно официальной статистике (рис.4) на данный момент более половины всех смартфонов работают под управлением Android версии 6.0 и выше [12].

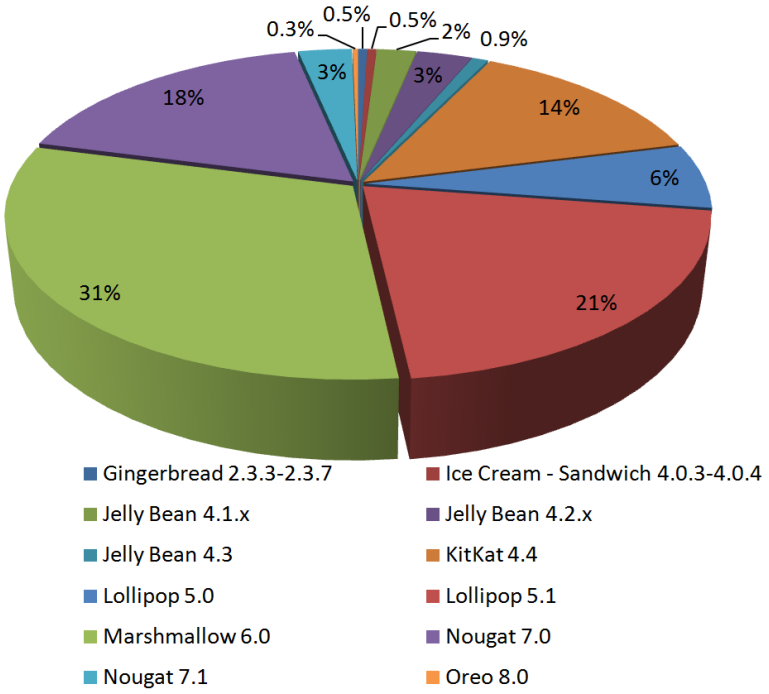


Рис. 4. Статистика использования версий ОС Android

Также уязвимо огромное количество IoT-устройств (такие как принтеры с функцией беспроводной печати, различная «умная» домашняя техника и носимая электроника), большинство из которых,

вероятно, никогда не получат обновление клиента WPA_SUPPLICANT.

Противодействие

Выяснилось, что данная уязвимость может быть устранена программно, без необходимости аппаратных изменений. Поэтому для противодействия описанной выше атаке на WPA2 со стороны производителей необходимо выпустить исправления, вносящие некоторые изменения в процесс четырехстороннего рукопожатия, описанного в стандарте 802.11. В частности, можно внедрить механизм, осуществляющий проверку, установлен ли используемый в данный момент ключ, и если это так, то запретить сброс счетчика пакетов в векторе инициализации. Или добавить логическую переменную, задача которой будет в том, чтобы клиент, получая повторное сообщение об установке ключа, генерировал ответ, но фактически не изменял ключ. Данные изменения должны значительно усложнить реализацию атаки. В свою очередь потребители должны своевременно обновить программное обеспечение устройств.

Заключение

Уязвимость на WPA2-AES, рассмотренная в статье, затрагивает сам стандарт аутентификации Wi-Fi, а не отдельные реализации методов защиты. Следовательно, использование любых разновидностей протоколов шифрования WPA и WPA2 создает зону риска как для пользователей (клиентов), так и для точек доступа. Во избежание любых атак пользователям следует обновлять программное обеспечение устройств, работающих со стандартом Wi-Fi (смартфоны, ноутбуки, точки доступа). Это увеличит вероятность того, что конфиденциальные данные пользователей (пароли, номера кредитных карт, логины сайтов) останутся в безопасности и не будут получены злоумышленниками.

Список литературы

1. *Васильев, Д. С.* Протоколы маршрутизации в MANET / Д. С. Васильев, А. В. Абилов // Электросвязь. – 2014. – № 11. – С 52–54.

2. *Vasiliev, D. S.* Relaying algorithms with ARQ in Flying Ad Hoc Networks / D. S. Vasiliev, A. Abilov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – Pp. 1–5.

3. *Vasilev, D. S.* Peer selection algorithm in Flying Ad Hoc Networks / D. S. Vasilev, A.V. Abilov, V.V. Khvorenkov // 2016 International Siberian

Conference on Control and Communications (SIBCON). – Moscow, 2016. – Pp. 1–4.

4. *Кайсина, И. А.* Анализ эффективности протоколов маршрутизации ALSR и AODV в летающей сети FANET / И. А. Кайсина, Д. С. Васильев, А. В. Абилов // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 87–90.

5. *Павлова, М. М.* Математическая модель передачи потоковых данных прикладного уровня по беспроводным каналам связи / М. М. Павлова, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 11. – С. 142–146.

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. *Павлова, М. М.* Оценка эффективности алгоритма ARQ при передаче потоковых данных в WLAN / М. М. Павлова, А. В. Абилов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2012. – № 7. – С. 141–145.

8. Опасность использования точек доступа Wi-Fi в общественных местах / М. М. Емельянова, В. Н. Емельянов, В. В. Титов, В. С. Машковцев // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 433–438

9. Особенности организации и перспективы муниципального Wi-Fi / Л. Д. Ахатова, А. П. Караваева, М. М. Емельянова, В. Н. Емельянов // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. 2016. – С. 354–360.

10. Vanhoef M., Piessens F. Key reinstallation attacks: forcing nonce reuse in WPA2 [Электронный ресурс] // mathyvanhoef.com. – URL: https://papers.mathyvanhoef.com/ccs2017.pdf (дата обращения: 23.11.2017).

11. Key reinstallation attacks breaking WPA2 by forcing nonce reuse [Электронный ресурс] // KRACK attacks: Breaking WPA2. – URL: https://www.krackattacks.com/ (дата обращения: 23.11.2017).

12. Статистика применения ОС Android [Электронный ресурс] // Android.com. – URL: https://developer.android.com/about/dashboards/ index.html (дата обращения: 23.11.2017).

V. N. Emelianov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: em.vl@mail.ru
M. M. Emelianova, senior lecturer
Email: em-mari@mail.ru
V. V. Titov, student
E-mail: shumagorath@mail.ru
M. U. Shamonov, student
E-mail: shmv.s.m.y@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Vulnerability of the WPA2 Authentication Mechanism

The article considers a new type of attack in Wi-Fi networks that use WPA2 protocol. The general scheme of protocol described. Example of attack on WPA-AES shown in article as for the most secured protocol. In conclusion, protection mechanisms against this type of attack are proposed.

Keywords: wireless networks, Wi-Fi, WPA, WPA2, unauthorized access, access point, Android, Linux, software, encryption, key.

УДК 004.942

М. М. Емельянова, ст. преподаватель
E-mail: em-mari@mail.ru
М. Н. Баженов, студент
E-mail: bmax662@gmail.com
А. С. Дунькин, студент
E-mail: dragonus.96@mail.ru
В. Н. Емельянов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: em.vl@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Современные системы краудсорсинга и их уязвимости

В статье рассматривается понятие краудсорсинга, его классификация и типы. Приводятся примеры краудсорсинговых систем, используемых в различных сферах деятельности современного общества. На основе платформы GoogleMaps раскрываются проблемы использования краудсорсинга, а также выявляются опасности утечки персональных данных при его применении к данной платформе.

© Емельянова М. М., Баженов М. Н., Дунькин А. С., Емельянов В. Н., 2018

Ключевые слова: краудсорсинг, проекты, уязвимость, утечка персональных данных, GoogleMaps.

Понятие краудсорсинга

Краудсорсинг представят собой современный инструмент выполнения организационных, поисковых, созидательных и другого вида функций внешними исполнителями, круг которых изначально не определен и достоверность которых зачастую неизвестна.

Предприятия и организации, решающие свои задачи с помощью использования системы краудсорсинга, для достижения цели привлекают случайных людей и их группы, которые часто работают на безвозмездной основе или за небольшую плату. При сборе информации, идей и проектов от этих людей происходит достижение поставленной общей цели или реализация нового проекта.

Дословно с английского краудсорсинг (crowdsourcing, crowd – «толпа» и sourcing – «использование ресурсов») можно перевести как использование творческих способностей толпы для достижения целей. В этом и есть суть понятия краудсорсинга, введенного в 2006 г. редактором американского журнала «Wired» М. Робинсоном, который, вместо того чтобы нанимать группу штатных сотрудников, принимал статьи от журналистов, желающих заработать [1].

Самый известный пример краудсорсинговой системы – «Википедия». Вместо того чтобы создавать интернет-энциклопедию собственноручно или нанять писателей и редакторов, разработчики ресурса Д. Уэйлс и Л. Сэнгер давали возможность пользователям сети Интернет самостоятельно добавлять информацию на безвозмездной основе. Результат этой инициативы – самая полная и популярная энциклопедия в мире, переведенная на 299 языков.

В настоящее время краудсорсинг очень популярен в сети Интернет, поскольку люди, как правило, более открыты в веб-проектах, т. к. нет физического контакта с работодателем и коллегами, поэтому они могут чувствовать себя комфортнее. При удаленной работе больше внимания уделяется потребностям проекта, а не общению с другими людьми.

Классификация и типы краудсорсинга

Классифицировать современные системы краудсорсинга можно по сфере применения и типу решаемых задач. По сфере применения краудсорсинг может быть экономический, социальный и политический. По типу решаемых задач: создание продукта, создание контента, по-

иск решения или людей, сбор информации, сбор мнений, голосование, тестирование, сбор денежных средств [1, 2].

Также существуют несколько типов краудсорсинга, которые нацелены на выполнение вышеперечисленных задач: создание, опрос, финансирование.

Crowd Creation («краудкриейшен», или коллективное творчество) – первый тип краудсорсинга, который представляет собой объединение результатов работы большого количества людей, направленное на решение общей цели или создание какого-либо продукта. Яркими примерами ресурсов, созданных по системе Crowd Creation, являются Wikipedia (интернет-энциклопедия), Linux (операционная система со свободным исходным кодом), iStockPhoto (банк фотографий).

Crowd Voting («краудовотинг», или народное голосование) – метод получения информации от большого количества людей об их мнении. Данный тип краудсорсинга имеет самый высокий уровень участия пользователей. Примером такой системы можно назвать всем известный интернет-ресурс «Кинопоиск», где рейтинги фильмов определяют зрители.

Crowdfunding («краудфандинг», или финансирование толпой) используется для сбора денежных средств от множества людей для финансирования бизнеса, творческих инициатив и проектов, благотворительных организаций и т. д. Самыми известными площадками для сбора инвестиций считаются: Kickstarter, Indiegogo, RocketHub и Crowdrise. Именно краудфандинговые проекты имеют на сегодняшний день наибольшую популярность.

Ключевую роль в развитии краудсорсинга играют краудплатформы, на которых размещается информация о краудсорсинговых проектах, конкурсах или предлагается для выполнения творческая, организационная или иная работа. Приведем пример крауд-платформ российского интернет-сегмента.

City celebrity. Крупнейшая российская независимая краудсорсинговая платформа или интерактивный сервис для продвижения творческих проектов и поиска единомышленников (http://citycelebrity.ru). Там размещаются объявления о дизайнерских и образовательных проектах, проектах организации культурных событий, конкурсах фотографов, хореографов, писателей, иллюстраторов и т. д.

Innobos. Крауд-платформа или проект, в котором каждый может стать автором, разработчиком и инвестором уникальных товаров и получать долю прибыли от их продаж (http://innobos.ru). На платформе эффективно применяются краудовотинг и краудфандинг.

Godesigner. Крауд-платформа или биржа дизайнеров и заказчиков (https://godesigner.ru), которая позволяет сделать заказ на разработку сайтов, страниц социальных сетей, слоганов, логотипов, рекламы, флаеров и т. п. Авторы предлагают свои идеи, а заказчик уже выбирает и оплачивает понравившийся вариант.

Textdreamer. Крауд-платформа (https://textdreamer.ru), которая специализируется на нейминге, т. е. на разработке названия компании, товара, магазина, доменного имени или слогана. Заказчик назначает цену, пользователи придумывают продукт.

E-generator. Крауд-платформа, объединяющая творчески мыслящих людей со всего мира для решения любых креативных задач (http://www.e-generator.ru). Работает платформа на основе конкурса, который по творческому заданию заказчика проводится редакцией. В конкурсе могут участвовать сотни авторов, присылая тысячи идей, а заказчик выбирает понравившийся вариант. Можно ограничиться генерацией идей или заказать ее реализацию.

Sberbank21.ru. Крауд-платформа, в которой просматриваются идеи и предложения пользователей специалистами учреждения для их изучения и дальнейшего внедрения в банковскую систему с целью создания простых, понятных и удобных услуг и сервисов [3].

Также приведем примеры краудсорсинговых сервисов и проектов, работающих в разных сферах жизни современного общества [4].

Probok.net – участники предлагают различные варианты оптимизации движения в Москве, и лучшие из них после обсуждения подаются в госструктуры.

Lizaalert.org – добровольцы ищут пропавших людей

Radiation.crowdmap.com (карта радиации) – платформа для сбора информации об уровне радиации по всему миру.

Climateprediction.net – самый большой в мире проект добровольных вычислений прогноза изменений климата Земли в ближайшие 50 лет.

Openstreetmap.org – свободная карта мира, предлагающая пользователям собственноручно создавать подробные карты городов с указанием данных о дорогах, организациях и других объектах инфраструктуры.

Busuu.com и duolingo.com – бесплатное изучение иностранных языков с их носителями.

Threadless.com – создание футболок с необычными рисунками. Принт для футболок отправляют пользователи, они же голосуют за самые лучший и оплачивают конечный результат. Threadless лишь запускает процесс производства футболок.

Таким образом, решение многих задач для поддержки культурных инициатив, развития бизнеса, образования и просто инновационных идей может оперативно осуществляться на основе краудсорсинга, который представляет собой эффективное взаимодействие заказчика и исполнителя [4].

Идея краудсорсинга общедоступна в десятках областей человеческих знаний. К работе над разнообразными задачами привлекаются миллионы людей, среди которых будут те, кто в состоянии решить поставленную задачу. Краудсорсинг позволяет решить множество проблем, которые трудно решить экспертам-одиночкам. Попросить помощи у сетевых пользователей гораздо дешевле, чем нанимать дорогостоящих консультантов или проводить маркетинговые исследования [3].

Но при использовании краудсорсинга могут возникать некоторые сложности. Появляется очень много бесполезных идей и мнений, генерируемых пользователями, что обусловлено недостаточной мотивацией исполнителей. Это, в свою очередь, может привести к снижению качества конечного продукта, а в особых случаях повлечь за собой материальный вред.

Уязвимости краудсорсинговой системы на примере Google Maps

При анализе возможностей сервисов компании Google в Интернете обнаружилось, что в картографическом сервисе Google Maps («Гугл карты») присутствует краудсорсинговая модель. Если несколько людей захотят изменить информацию о каком-либо объекте, расположенном на карте Google Maps, то система автоматически заменит эти данные без ведома владельца объекта.

Для эксперимента был выбран объект, в котором с помощью запроса пользователей были изменены данные заведения, а именно номер телефона. На рис. 1 показан процесс изменения номера телефона, который может выполнить любой пользователь.

Гугл изменил данные после запросов трех пользователей. На рис. 2 видно, что информация поменялась на недостоверную.

После проведения эксперимента данные были изменены на первоначальные.

На первый взгляд безобидное изменение номера телефона может привести к печальным последствиям. Злоумышленники, указав свой номер телефона вместо телефона организации для перенаправления звонков, могут незаконно получать сведения от ее клиентов.

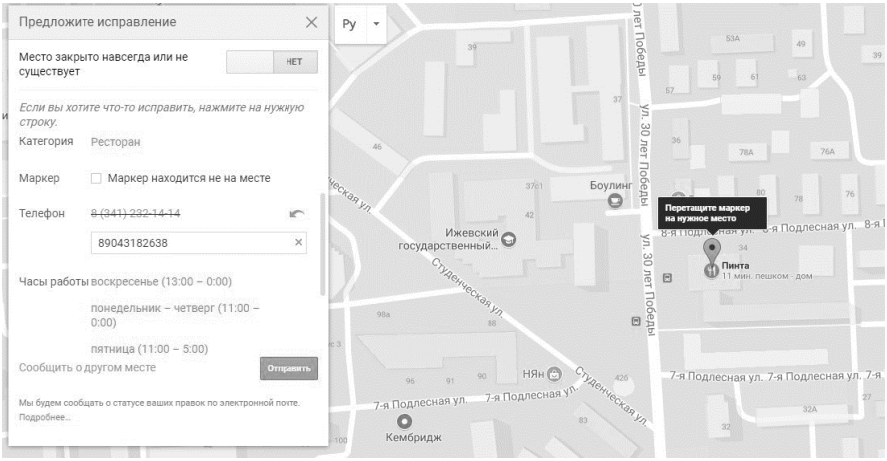


Рис. 1. Изменение информации об организации

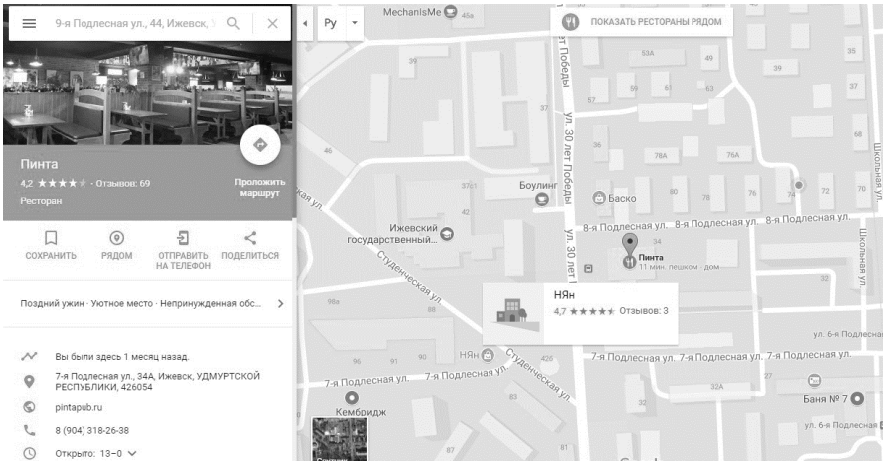


Рис. 2. Информация об организации с внесенными изменениями

Также можно легко получить конфиденциальную информацию, номера счетов, пароли путем смены номера телефона государственных организаций или банков. Изменив легитимную информацию, злоумышленник может украсть важные данные или денежные средства людей. Также сервис Google Maps позволяет заменить не только номер телефона, но и режим работы, сферу деятельности или вообще закрыть ор-

ганизацию. С помощью некоторых манипуляций, описанных в [5, 6] можно избежать утечки информации.

Контрастным и безопасным примером картографического сервиса является разработка от системы «Яндекс» – «Яндекс.Карты». «Яндекс.Карты» используют штатных специалистов для сбора информации по каждому объекту и производят редактирование карт с интервалом в 1 месяц. По такому же принципу работает и система 2ГИС. Это позволяет гарантировать пользователям достоверность увиденных на картах данных и спокойствие владельцев фирм.

Но другой сервис – «Яндекс.Пробки» – тоже имеет краудсорсинговую модель. Данный веб-сервис является расширением функциональности сервиса «Яндекс.Карты» и позволяет отслеживать некоторые дорожные ситуации, такие как аварии, перекрытие дорог, ремонтные работы, камеры отслеживания превышения скорости. Пользователи могут не только видеть информацию о состоянии на автодорогах, но и вносить туда изменения. Для эксперимента мы добавили информацию о несуществующей аварии на дороге (рис. 3), и через четыре минуты это смогли увидеть все пользователи сервиса «Яндекс.Пробки» (рис. 4).

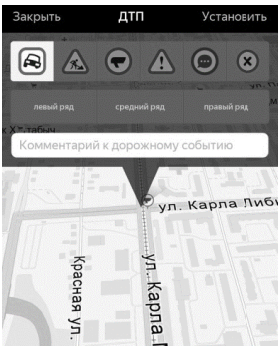


Рис. 3. Добавление ложной информации в сервис «Яндекс.Пробки»

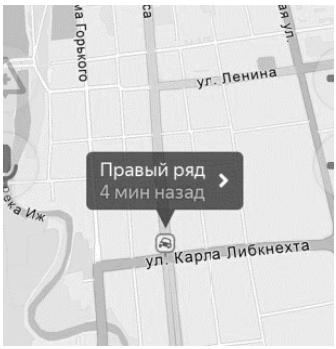


Рис. 4. Отображение внесенной информации в сервисе «Яндекс.Пробки»

Таким образом, не потребовалось подтверждения ни от других клиентов сервиса, ни от служб автоинспекции, достаточно было единоличного оповещения о ложном происшествии. Таким образом, внося недостоверную информацию о состоянии на автодорогах, можно манипулировать в собственных интересах потоками автотранспорта, водители которого используют сервис «Яндекс.Пробки».

Заключение

Использование краудсорсинга в развитии социальной, экономической и политической жизни современного общества приобретает все больший интерес. Об этом свидетельствует огромное число проектов, которые основаны на данной системе, и рост их популярности среди населения всего мира. Но применение краудсорсинга не всегда уместно, что было показано на примере сервиса Google Maps. На наш взгляд, системе Google не следует использовать краудсорсинг в рамках картографического сервиса Google Maps, а организациям, которые отмечены на этих картах, следить за указанной там информацией.

Список литературы

1. *Лунев, В. Д.* Краудсорсинг / В. Д. Лунев, В. С. Конова, Е. А. Шульга // Новая наука : Проблемы и перспективы. – Стерлитамак : РИЦ АМИ, 2016. – Ч. 2. – С. 81–83.

2. *Беленький А.* Многоликий краудсорсинг [Электронный ресурс]]. – URL: http://compress.ru/Article.aspx?id=22501 (дата обращения: 11.01.2018).

3. *Епинина, В. С.* Краудсорсинг как технология партиспации в государственном менеджменте // Вестник Института комплексных исследований аридных территорий. – 2012. – Т. 2. № 2 (25). – С. 117–122.

4. *Никитина, О. А.* Краудсорсинг как инструмент инновационного социального партнерства в сфере культуры, туризма, молодежного предпринимательства / О. А. Никитина, В. Е. Бошкова // Сборник научных трудов по материалам XI Международной науч.-практ. конф. – 2015. – С. 163–166.

5. Анализ методов обнаружения аномалий сетевого трафика / В. Н. Емельянов, М. М. Емельянова, Е. Л. Зиновьева, М. Ю. Шамонов // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 420–425.

6. Опасность использования точек доступа Wi-Fi в общественных местах М. М. Емельянова, В. Н. Емельянов, В. В. Титов, В. С. Машковцев // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 433–438.

M. M. Emelianova, senior lecturer
Email: em-mari@mail.ru
M. N. Bazhenov, student
E-mail: shumagorath@mail.ru
A. S. Dunkin, student
E-mail: shmv.s.m.y@gmail.com
V. N. Emelianov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: em.vl@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Modern Crowdsourcing Systems and Their Vulnerabilities

The article deals with the concept of crowdsourcing, its classification and types. Examples of crowdsourcing systems used in various domains of activity of modern society. Based on the GoogleMaps platform, the problems of using crowdsourcing are revealed, as well as the risks of leaking personal data when it is applied to this platform.

Keywords: crowdsourcing, projects, vulnerability, leakage of personal data, GoogleMaps

УДК 629.78

В. С. Ермаков, студент
E-mail: narcoticsound@mail.ru
М. М. Емельянова, старший преподаватель
E-mail: em-mari@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова

Реализация коммутатора в бортовой телеметрической системе

Развитие электроники в конце XX века привело к возможности и необходимости появления отдельной ее отрасли – телеметрии. В данной статье рассматривается малогабаритная бортовая информационно-телеметрическая система транспортного корабля модернизированная (МБИТС-ТКМ), реализованная на коммутаторе. Коммутатором служит микроконтроллер 1986ВЕ1Т с воспринимающими элементами, получающими сигналы от различных датчиков.

Ключевые слова: телеметрия, бортовая телеметрическая система, микроконтроллер, коммутатор, 1986ВЕ1Т.

© Ермаков В. С., Емельянова М. М., 2018

Бортовая телеметрическая система

Бортовая телеметрическая система (БТМС) – совокупность распределенных по транспортному кораблю средств сбора, преобразования и передачи информации.

Одним из примеров БТМС является малогабаритная бортовая информационно-телеметрическая система транспортного корабля модернизированная (МБИТС-ТКМ). МБИТС-ТКМ предназначена для сбора, преобразования, хранения и передачи на наземную и бортовую аппаратуру информации о состоянии систем, агрегатов и конструкции изделий. Она включает в себя два блока обработки информации, пять моноблоков сбора сообщений, блок автоматики и два радиопередающих устройства. Аппаратура МБИТС-ТКМ может эксплуатироваться в составе пилотируемых и автоматических космических аппаратов [1, 2].

Основные характеристики МБИТС:

1. Количество контролируемых параметров: аналоговых – 256; температурных – 256; дискретных – 1088.

2. Скорость передачи информации – 256000 бит/с.

3. Объем памяти статического запоминающего устройства – 32 Мбайт.

4. Максимальное энергопотребление – не более 3,5 А.

5. Масса приборов – не более 29 кг.

Микроконтроллер в качестве коммутатора

Назначением блока бортовой телеметрии можно считать опрос, обработку и выдачу информации с различных датчиков по интерфейсам связи в узел приема – коммутатор. Чаще всего используют датчики показаний тока, напряжения, температуры, давления, влажности, расходомеры, модуль инерциальной навигации, содержащий в себе акселерометр, гироскоп, магнетометр совместно с приемником-датчиком.

В БТМС коммутатор считается одним из основных компонентов. Если количество используемых в системе датчиков превышает предел информативности основного коммутатора, то возможно использование дополнительных, локальных коммутаторов [3].

Коммутаторы могут быть выполнены на базе микроконтроллера или программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Сравним три микроконтроллера, которые могут выступать в качестве коммутатора в бортовой телеметрической системе: 1887ВЕ1У, MultiClet MCp0411100101 и 1986ВЕ1Т. Результаты сравнения сведем в табл. 1.

Таблица 1. **Сравнительная характеристика микроконтроллеров**

Изделие	1887ВЕ1У	МСр0411100101	1986ВЕ1Т
Тактовая частота, МГц	8	100	132
Производительность, Gflops	-	2,4	2.6
Разрядность, бит	8	32/64	32
Встроенная Flash, Кб	8	-	128
АЦП	8-разрядный	–	два 12-разрядных
ЦАП	-	–	2-канальный 12-разрядный
Линии ввода-вывода	24	104	96
Таймеры	два 8-разрядных	7	–
Каналы ШИМ	2	4	4
UART	есть	есть	есть
SPI	–	есть	есть
CAN	–	–	есть

1887ВЕ1У. Простой и дешевый вариант для управления несложными схемами. Его тактовая частота, наличие двух таймеров общего назначения, одного двухканального шинно-импульсного модулятора (ШИМ) и питания в 5 В делает его простым в наладке и монтаже. Наличие аналого-цифрового преобразователя (АЦП) позволяет использовать его как контроллер для простых замкнутых систем. Ограничением в использовании является маленькая память 8 Кбайт, 32 линии ввода-вывода и тактовая частота, которая не позволяет обрабатывать много входных сигналов АЦП одновременно. Все это делает его не применимым для управления силовой схемой.

MultiClet MCp0411100101. Быстрый и точный процессор с большим количеством линий ввода-вывода, тактовой частотой 100 МГц и 4 когерентными блоками. Наличие четырехканального ШИМ позволяет настраивать управление ключами. Этот процессор подходит для управления цифровыми устройствами, другими модулями и контроллерами. Скоростной канал Ethernet позволяет связывать его работу и с компьютером, и с внешним устройством. Недостатком данного процессора является отсутствие встроенной памяти и цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и АЦП. То есть его невозможно использовать там, где для схем управления выделено мало места, т. к. потребуются

внешние преобразователи АЦП и ЦАП. Таким образом, для управления силовыми схемами он также не подходит.

1986ВЕ1Т. 32-разрядный микроконтроллер авиационного назначения, построенный на базе высокопроизводительного RISC ядра, исполняется в металлокерамическом корпусе на 132 вывода. Содержит в себе три независимых четырехканальных ШИМ, два 16-разрядных АЦП и аналоговой компаратор. Высокая разрядность АЦП позволяет точно определять отклонения любых входных сигналов с датчиков. Четырехканальные ШИМ выполнены таким образом, что можно изменять их параметры, такие как длина импульса, длительность мертвого времени, а высокая точность вычисления ошибок дает возможность делать это быстро. Всё это позволяет убирать помехи, скачки напряжения при переключениях силовых приборов. Наличие трех независимых ШИМ позволяет управлять каждым силовым прибором отдельно, а наличие 132 линий ввода-вывода дает множество вариантов формирования для дополнительных модулей контроля датчиков. Тактовая частота позволяет быстро производить любые действия, а аппаратная реализация деления и умножения за один цикл позволяет минимизировать вносимое самим контроллером отставание [4].

Исходя из характеристик сравниваемых микроконтроллеров, для разработки МБИТС выбран микроконтроллер 1986ВЕ1Т. Микросхема микроконтроллера 1986ВЕ1Т приведена на рис. 1.

Данный микроконтроллер работает на тактовой частоте до 144 МГц и содержит 128 Кбайт flash-памяти программ и 48 Кбайт ОЗУ. Периферия включает в себя [4]:

- контроллер USB-интерфейса со встроенным аналоговым приемопередатчиком со скоростью передачи 12 Мбит/с (Full Speed) и 1,5 Мбит/с (Low Speed);
- стандартные интерфейсы UART и SPI;
- авиационные интерфейсы по ГОСТ 18977–79 и ГОСТ Р52070–2003;
- цифровой интерфейс Ethernet со скоростью передачи 10/100 Мбит;
- интерфейс MII со встроенным аналоговым приемопередатчиком;
- контроллер внешней системной шины, позволяющий работать с внешними микросхемами статического ОЗУ и ПЗУ, NAND Flash-памятью и другими периферийными устройствами.

Встроенные RC-генераторы на 8 МГц и 40 кГц, внешние генераторы 2…16 МГц и 32 кГц и две схемы умножения тактовой частоты для

ядра и USB интерфейса позволяют гибко настраивать скорость работы микроконтроллера.

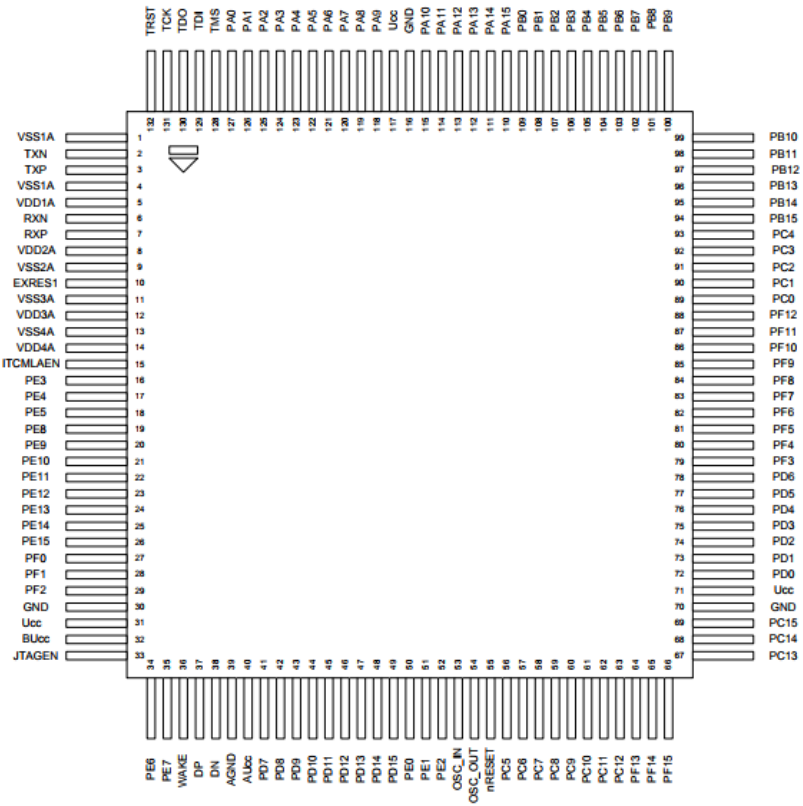


Рис. 1. Микросхема микроконтроллера серии 1986 в металлокерамическом корпусе

Встроенный регулятор, предназначенный для формирования питания внутренней цифровой части, формирует напряжение 1,8 В и не требует дополнительных внешних элементов. Таким образом, для работы микроконтроллера достаточно одного внешнего напряжения питания в диапазоне от 3,0 до 3,6 В. Также в микроконтроллерах реализован батарейный домен, работающий от внешней батареи, который предназначен для обеспечения функций часов реального времени и сохранения некоторого объема данных при отсутствии основного питания.

Данный микроконтроллер прост в освоении, т. к. для него существует большое количество средств программной и аппаратной технической поддержки.

Заключение

Изучив основные характеристики микроконтроллера 1986ВЕ1Т, можно сделать вывод, что по функциональности и быстродействию он явно выигрывает у большинства микроконтроллеров отечественного производства, используемых для разработки систем бортовой телеметрии.

Список литературы

1. *Сырова, А. С.* Бортовые системы управления космическими аппаратами. – М. : МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.

2. Бортовая аппаратура [Электронный ресурс] // Russianspacesystems.ru. – URL: http://russianspacesystems.ru/bussines/cosmostroy/bortovaya-apparatura/ (дата обращения: 22.11.2017).

3. *Пузанкова, Д. В.* Микропроцессорные системы. – СПб. : Политехника, 2002. – 935 с.

4. Спецификация микроконтроллера 1986ВЕ1Т [Электронный ресурс] // Milandr.ru. – URL: http://ic.milandr.ru/products/mikrokontrollery_i_ protsessory /1986ve1t/?tab=DOCS (дата обращения: 22.11.2017).

V. S. Ermakov, student
E-mail: narcoticsound@mail.ru
M. M. Emelianova, senior lecturer
E-mail: em-mari@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Implementation of the Switch in the Onboard Telemetry System

The development of electronics at the end of the 20th century led to the possibility and necessity of its separate branch – telemetry. In this article, the small-sized onboard information and telemetry system of the transport ship is modernized, implemented on the switch. The switch serves as the microcontroller 1986BE1T with sensing elements receiving signals from various sensors.

Keywords: telemetry, onboard telemetry system, microcontroller, 1986BE1T, switch

УДК 621.396.13

А. В. Жидяев, аспирант
E-mail: alexander.zhidiaev@yandex.ru
А. Н. Копысов, канд. техн. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование способов оценки фазы несущей сигнала с GMSK

В статье рассмотрены три способа оценки начальной фазы несущей сигнала с GMSK: 2P – Power method, открытая квадратичная петля, обратная связь по решениям. На основе имитационного моделирования определен способ, обеспечивающий максимальную помехоустойчивость демодулятора сигнала системы спутниковой связи «Гонец – Д1М».

Ключевые слова: GMSK, MSK, восстановление фазы несущей, обратная связь по решениям, 2P – Power method.

Введение

Частотная модуляция с минимальным сдвигом (MSK) и ее модификация – гауссова частотная модуляция с минимальным сдвигом (GMSK) – находят широкое применение в современных системах связи и связной аппаратуре различного назначения. Например, система мобильной связи GSM использует GMSK с отношением полосы пропускания фильтра гаусса к скорости передачи, равным 0,3. Устройства, работающие в беспроводной сети передачи данных Bluetooth, также используют GMSK с аналогичным отношением 0,5. Кроме того, сигнал GMSK используется в системах спутниковой связи «Гонец – Д1М» и NEW ICO (ICO Global Communication). Популярность данного типа модуляции объясняется достаточно высокой помехоустойчивостью сигнала (сопоставимой с BPSK) и отсутствием изменения амплитуды модулированного сигнала, что позволяет применять в радиотракте нелинейные усилители мощности с более высоким КПД. Однако в целях достижения максимальной помехоустойчивости для приема таких сигналов необходимо применять алгоритмы когерентной демодуляции. Поскольку задающие генераторы передатчиков и приемников имеют определенное рассогласование частот, а любые алгоритмы

© А. В. Жидяев, А. Н. Копысов, 2018

оценки частоты имеют погрешность, возрастающую при уменьшении отношения сигнал/шум, во всех алгоритмах когерентной демодуляции необходимо производить подстройку начальной фазы несушей во время приема. В литературе [1, 3, 4], рассмотрено достаточно большое количество алгоритмов оценки фазы и выделения несушей частоты из сигнала MSK без добавления известных данных. В работе рассматриваются три достаточно популярных алгоритма оценки фазы несущей: алгоритм «2P – Power», алгоритм на основе открытой квадратичной петли, алгоритм с обратной связью по решениям.

Сущность алгоритма «2P – Power» [1] заключается в возведении принятого сигнала в степень 2P и расчете фазы несущей сигнала по формуле

$$\theta = \frac{1}{2P}\arg\{\sum_{k=0}^{L_0-1} x^{2P}(k)\}, \qquad (1)$$

где параметр P для сигнала MSK равен 2; θ – фаза несущей, принимающая значения в диапазоне ±π/(2P); L_0 – количество символов для оценки; $x(k)$ – отсчеты радиосигнала. Схема алгоритма изображена на рис. 1.

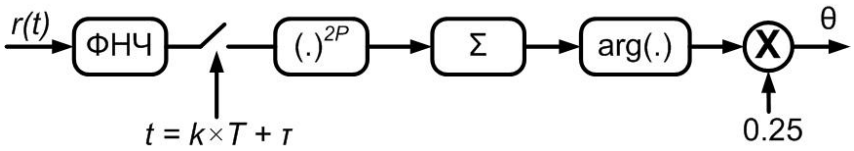


Рис. 1. Схема алгоритма оценки фазы «2P – Power»

Как видно из схемы, до применения алгоритма необходимо произвести тактовую синхронизацию. Поскольку набег фазы на длительности одного символа для сигнала MSK составляет ±π/2, в его сигнальном созвездии четыре точки, сдвинутые на π/2, следовательно, алгоритм «2P – Power» является частным случаем схем с подавленной несущей высших порядков [2].

В литературе [3, 4] описан алгоритм частотной синхронизации на основе возведения сигнала с MSK в квадрат (рис. 2).

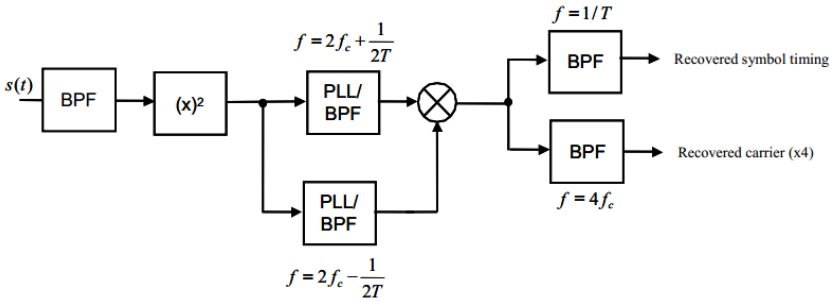


Рис. 2. Схема алгоритма восстановления несущей с использованием открытой квадратичной петли

Данный алгоритм может формировать на выходе четвертую гармонику несущей частоты, которую можно использовать для синхронизации. Зная связь частоты и фазы гармонического сигнала, можно модифицировать открытую квадратичную петлю для оценки фазы. Схема модифицированного алгоритма представлена на рис. 3.

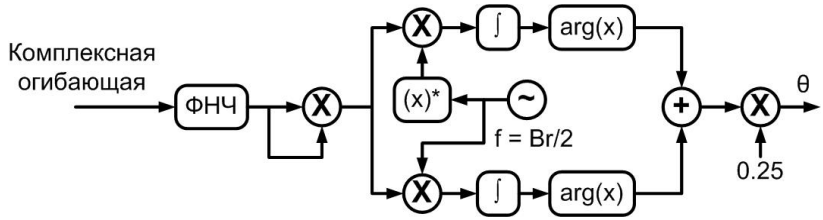


Рис. 3. Схема алгоритма оценки фазы на основе открытой квадратичной петли

Последний алгоритм, рассматриваемый в рамках исследования, который можно синтезировать на основе схем с обратной связью по решениям [5], применим к сигналам с любым типом модуляции. Общая схема оценки фазы несущей частоты с использованием обратной связи по решениям изображена на рис. 4.

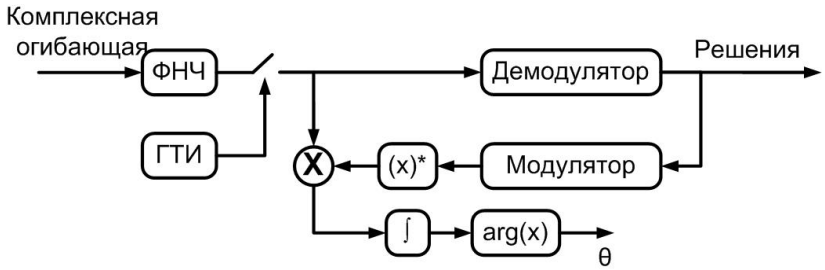


Рис. 4. Схема алгоритма оценки фазы по принятым решениям

Данный алгоритм требует установки тактовой синхронизации и принятия достоверных решений для начала работы. Такой алгоритм позволяет минимизировать дисперсию ошибок при оценке фазы за счет того, что все операции над сигналом линейны.

Описание эксперимента

В качестве основы для имитационного моделирования будет использоваться сигнал, применяемый для передачи данных в системе спутниковой связи «Гонец – Д1М». Параметры сигнала следующие:

1) тип модуляции – GMSK с параметром BT = 0,5;
2) скорость передачи – 16 кбит/с;
3) длительность сообщения – порядка 2000 бит;
4) погрешность оценки частоты ± 5 Гц.
5) время оценки фазы несущей – 100 символов.

Алгоритм демодуляции сигнала имеет структуру, изображенную на рис. 5.

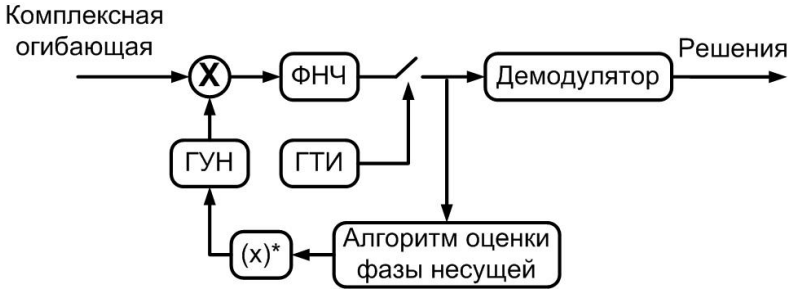


Рис. 5. Схема алгоритма демодуляции сигнала с подстройкой фазы несущей

Для оценки фазы были использованы поочередно три рассмотренных метода. Алгоритм функционирования имитационной модели представлен на рис 6.

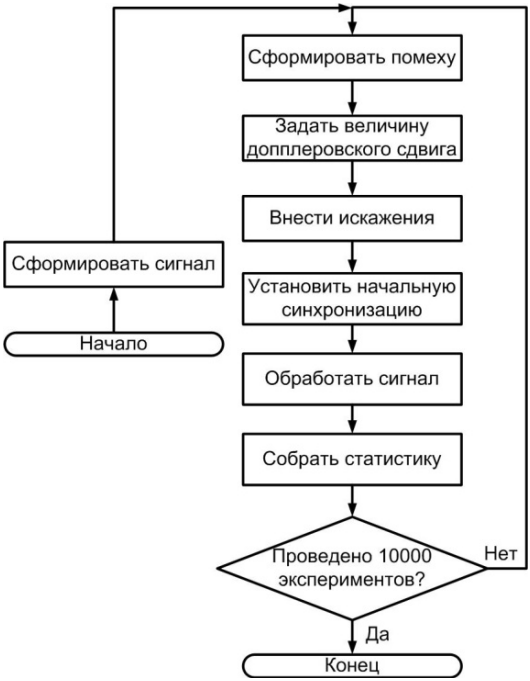


Рис. 6. Алгоритм работы имитационной модели

Параметры имитационной модели следующие:

1) количество экспериментов – 10000;
2) диапазон изменения величины допплеровского сдвига ±5000 Гц;
3) тип помехи – аддитивный белый гауссовский шум;
4) фиксируемые величины – вероятность битовой ошибки, вероятность потери синхронизации.

Результаты эксперимента

Результаты моделирования алгоритмов оценки фазы несущей представлены на рис. 7 и 8.

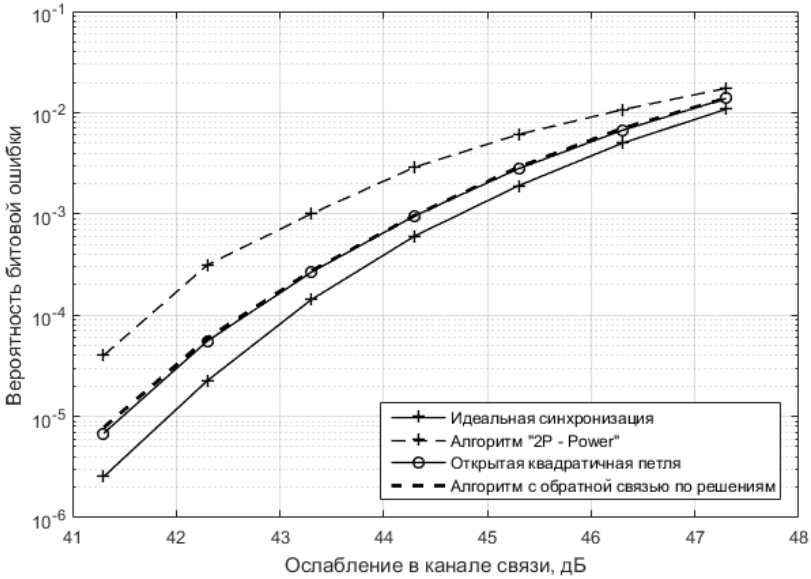


Рис. 7. Зависимость вероятности битовой ошибки от ослабления в канале связи для различных алгоритмов оценки фазы несущей

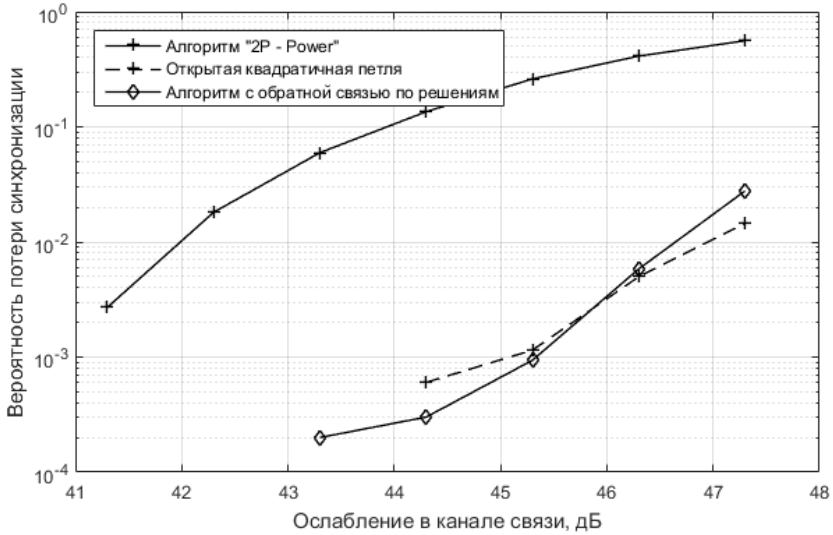


Рис. 8. Зависимость вероятности потери фазовой синхронизации от ослабления в канале связи для различных алгоритмов оценки фазы несущей

Как видно из графиков, алгоритм «2P – Power» обеспечивает наибольшую вероятность ошибочного приема, уменьшая динамический диапазон системы связи на 1,5 дБ. Кроме того, вероятность потери фазовой синхронизации для этого алгоритма максимальная во всем диапазоне измерений.

Алгоритм с обратной связью по решениям и алгоритм на основе квадратичной петли показали сопоставимые результаты по помехоустойчивости. По сравнению с идеальной синхронизацией, эти алгоритмы уменьшают динамический диапазон системы связи примерно на 0,5 дБ. При ослаблении сигнала в канале связи менее чем на 46 дБ алгоритм с обратной связью по решениям обеспечивает меньшую вероятность потери фазовой синхронизации по сравнению с алгоритмом на основе квадратичной петли. При большем ослаблении в канале характеристики алгоритма с обратной связью по решениям ухудшаются.

Выводы

На основе имитационного моделирования можно сделать ряд выводов:

1) Алгоритм «2P – Power» обеспечивает наихудшие характеристики демодулятора и не рекомендуется для реализации в подобных устройствах;

2) Алгоритм на основе открытой квадратичной петли и алгоритм с обратной связью по решениям обладают одинаковыми характеристиками помехоустойчивости;

3) В демодуляторах, начинающих приём с достаточно точной синхронизацией, рекомендуется использовать алгоритм с обратной связью по решению, поскольку он использует наименьшее число арифметических операций для оценки фазы несущей. Если прием начинается без установки начальной синхронизации, предпочтительнее использовать открытую квадратичную петлю для установки начальной синхронизации и подстройки.

Список литературы

1. *Mengali, U.* Synchronization techniques for digital receivers / U. Mengali, A. N. D'Andrea. – New York : Plenum Press, 1997. – 520 p.

2. *Скляр, Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.

3. *Nezami, M. K.* RF architectures and digital signal processing aspects of digital wireless transceivers. – 2003. – 513 p.

4. *Chen, W.-K.* The electrical engineering handbook. – USA : Elsevier Academic Press, 2004 – 1208 p.
5. *Прокис, Дж.* Цифровая связь. – М. : Радио и связь, 2000. – 798 с.

A. V. Zhidiaev, postgraduate student
A. N. Kopysov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: alexander.zhidiaev@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Study of Methods for Estimating Phase of the Carrier Signal with GMSK

The article considers three ways to estimate phase of a carrier signal with GMSK: 2P - Power method, open quadratic loop, feedback on solutions. Based on simulation, the method witch providing maximum noise immunity of the signal demodulator of the satellite system "Gonets-D1M" is defined.

Keywords: GMSK, MSK, carrier phase recovery, decision feedback, 2P - Power method

УДК 62-754.4

А. А. Закиров, аспирант
E-mail: zexeso@gmail.com
К. В. Шишаков, канд. физ.-мат. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Алгоритмическое обеспечение макета бесплатформенной инерциальной навигационной системы на основе твердотельных волновых гироскопов

Представлены результаты разработки алгоритмического обеспечения навигационного алгоритма бесплатформенной инерциальной навигационной системы на основе твердотельных волновых гироскопов и кварцевых акселерометров с использованием параметров Родрига – Гамильтона. Выполнено сопряжение математической модели с макетным образцом. Приведены результаты работы алгоритма. Рассмотрены пути повышения точности работы алгоритма.

Ключевые слова: БИНС, твердотельный волновой гироскоп, акселерометр, инерциальная навигация, математическая модель, кватернионы.

© Закиров А. А., Шишаков К. В., 2018, 2018

Методы инерциальной навигации получают все более широкое применение при решении проблем навигации надводных, подводных и воздушных судов. Основная задача инерциальной навигации состоит в определении местоположения движущегося объекта (его курса, скорости, пройденного пути и др.) с помощью установленных на нем датчиков линейного ускорения (акселерометров) и гироскопических устройств (позволяющих определять углы поворота и наклона объекта).

Определение местоположения объекта на основе сигналов чувствительных элементов производится в вычислительном устройстве с помощью навигационного алгоритма.

К чувствительным элементам бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) предъявляются повышенные точностные требования. В разработанном макете БИНС используются три твердотельных волновых гироскопа (ТВГ) и три кварцевых акселерометра АК-15, рекомендованных для использования в БИНС (были применены на самолетах АН-70, ТУ-204, ИЛ-96).

Для разработки навигационного алгоритма был использован макетный образец БИНС, состоящий из вычислительного устройства (компьютера) и инерциального навигационного блока (ИНБ). В свою очередь, ИНБ состоит из трех ТВГ и трех акселерометров. Для работы с ТВГ используются платы управления, осуществляющие вывод информации через последовательный порт. Для работы с акселерометрами используется аналогово-цифровой преобразователь L-Card модели E14-140, вывод информации через USB. Прием сигналов гироскопов и акселерометров, а также их участие в навигационном алгоритме осуществляется с помощью языка программирования Delphi 7.0.

Входящие в состав ИНБ чувствительные элементы способны выдавать информацию с повышенной частотой. Выдача актуальной информации об объекте (углы ориентации – курс, крен, тангаж, а также долгота и широта) производится с более низкой частотой. Поэтому в реализованном навигационном алгоритме выходные полезные сигналы формировались по пяти замерам (рис. 1).

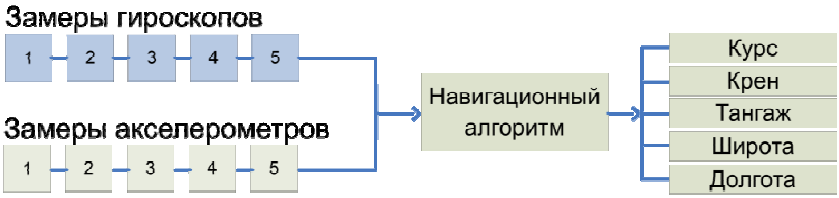


Рис. 1. Входные и выходные данные навигационного алгоритма на одном такте

В навигационном алгоритме БИНС использовались кватернионы [1] для последовательного выполнения преобразований от инерциального («u») трехгранника $O_uX_uY_uZ_u$ к географическому («g») $OX_gY_gZ_g$ и от географического к связанному $OXYZ$. Переход от трехгранника $O_uX_uY_uZ_u$ к $OX_gY_gZ_g$ выполняется посредством кватерниона K, а переход от $OX_gY_gZ_g$ к связанному трехграннику $OXYZ$ – через кватернион Λ. Результирующий переход от трехгранника $O_uX_uY_uZ_u$ к $OX_gY_gZ_g$ – через кватернион M [2].

Разработанный навигационный алгоритм макета БИНС обобщенно реализует следующую последовательность шагов:

1. Определение известных констант – скорость вращения Земли, радиус Земли, величина ускорения свободного падения. Уточнение начальных данных широты и долготы из внешних источников.

2. Прием сигналов с чувствительных элементов ИНБ – приращение физического угла с гироскопов, кажущееся ускорение (разница между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением) с акселерометров. Приход данных осуществляется в фиксированные моменты времени (такты) – 500 раз в секунду.

3. Вычисление приращения широты и долготы за такт времени. Вычисление начальных значений кватернионов и углов ориентации объекта. Вычисление проекций вектора абсолютной угловой скорости географической системы координат на свои оси.

4. Вычисление кватерниона K первого преобразования, т. е. кватерниона перехода из инерциальной системы координат в географическую систему координат.

5. Составление вектора Эйлера по методу Пола Сэвэджа [3]. Для одного расчета используются данные из пяти тактов. На основе вектора вычисляется кватернион перехода M из инерциальной системы координат в связанную с прибором систему координат.

6. Вычисление кватерниона перехода Λ из географической системы координат в приборную систему координат. Искомые углы курса, тангажа и крена выражаются через параметры Родрига – Гамильтона, т. е. через элементы кватерниона Λ.

7. Вычисление вектора гиперкомплексного отображения кажущегося ускорения в географической системе координат.

8. Вычисление долготы, широты с помощью составляющих относительной скорости движения, найденной с помощью вычисленных и повторно уточненные проекций скомпенсированного («полезного») ускорения.

9. Повторение алгоритма с пункта 2.

Построенный алгоритм проверялся на лабораторном макете ИНБ с чувствительными элементами, в состоянии покоя, запущенный в течение 20 минут. Начальными значениями широты, долготы и ускорения свободного падения были приняты соответствующие величины для Ижевска. Начальные значения углов ориентации равны нулю.

Величины на осях ординат каждого графика на рис. 2 соответствуют градусам. Курс с нуля сместился на четыре градуса, крен на семь градусов, тангаж на три градуса. Максимальное смещение курса за все время работы – восемь градусов, крена – девять градусов, тангажа – семь градусов.

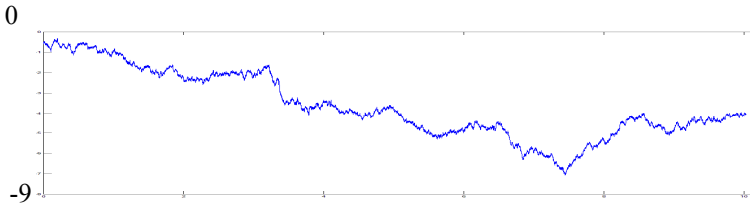


Рис. 2а. Изменение угла курса за 20 минут работы алгоритма

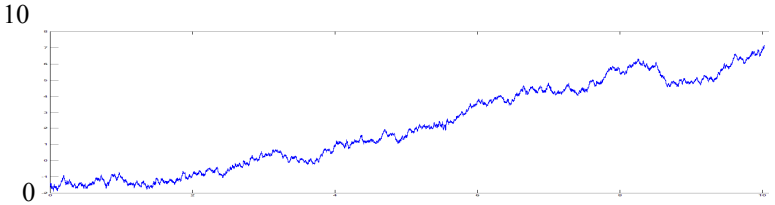


Рис. 2б. Изменение угла крена за 20 минут работы алгоритма

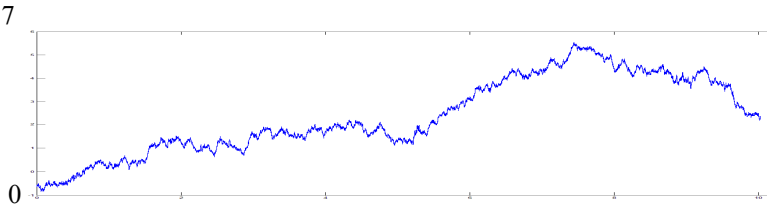


Рис. 2в. Изменение угла тангажа за 20 минут работы алгоритма

Согласно результатам, представленным на рис. 2, лабораторный макетный образец с текущим навигационным алгоритмом на данном этапе имеет невысокую точность. Отчасти это вызвано тем, что он еще находится в начальной стадии лабораторной настройки и в нем использовался внешний аналого-цифровой преобразователь для получения сигналов с акселерометров. При этом не была организована идеальная синхронизация получаемых сигналов с чувствительных элементов. Если же все сигналы вывести в один канал для формирования пакета данных, включающих и гироскопы, и акселерометры, то это должно повысить точность алгоритма.

Для дальнейшего повышения его точности потребуется решить следующие задачи:

1) калибровка БИНС как в целом, так и входящих в нее чувствительных элементов по отдельности;

2) применение цифровых фильтров для выделения полезной составляющей из шума чувствительных элементов;

3) использование моделей формирования выходных сигналов ТВГ с учетом случайных и систематических погрешностей [4–7];

4) оптимизация и настройка программных алгоритмов.

Список литературы

1. *Бранец, В. Н.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. – М. : Наука, 1973. – 320 с.

2. *Матвеев, В. В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.

3. *Savage, P. G.* Strapdown inertial navigation integration algorithm design part 1: attitude algorithms // Journal of Guidance, Control and Dynamics – American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1998. – Vol. 21. – No. 1. – Pp. 23–25.

4. *Шишаков, К. В*. Построение модели волновой динамики резонатора твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2009. – № 2 (14). – С. 66–75.

5. *Шишаков, К. В*. Модели объекта управления для системы поддержания стоячей волны в твердотельном волновом гороскопе // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 3 (47). – С. 144–147.

6. *Шишаков, К. В.* Анализ систематического дрейфа стоячей волны в твердотельном волновом гироскопе // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 4 (48). – С. 144–148.

7. Системный анализ погрешностей информационного сигнала ТВГ и методов их компенсации // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1 (19) – С. 181–191.

A. A. Zakirov, postgraduate student
E-mail: zexeso@gmail.com
K. V. Shishakov, CSc in phys. and math., associate professor
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Algorithmic Maintenance of a Mockup Strapdown Inertial Navigation System Based on a Hemispherical Resonator Gyroscope

The results of the development of a mockup strapdown inertial navigation system based on a hemispherical resonator gyroscope and quartz accelerometers using Rodrigues-Hamilton parameters have been presented. The mathematical model have been connected to the mockup. The results of the algorithm work are presented. The ways of increasing the accuracy of the algorithm work are considered.

Keywords: SINS, hemispherical resonator gyroscope, accelerometer, inertial navigation, mathematical model, quaternions

УДК 699.4.052.3 + 691.396.2

Е. К. Каргашин, студент
Е. М. Зайцева, канд. пед. наук, доц.
E-mail: em_zaytseva@yahoo.com
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Организация системы сопровождения движения подвижного состава на Российских железных дорогах с использованием средств радиосвязи

В статье рассматриваются основные принципы организации радиосвязи, применяемые для сопровождения подвижного состава на Российских железных дорогах. Рассказывается на примере, как происходит связь между работниками на железной дороге, какие виды радиосвязи бывают, кто ими пользуется.

Ключевые слова: радиосвязь, комплексная система радиосвязи, организация связи, виды радиосвязи на железных дорогах.

Введение

Роль железнодорожного транспорта в России трудно переоценить, ведь он обеспечивает максимальный объем грузоперевозок в мире. Железные дороги являются основным и важнейшим видом современного сухопутного транспорта. Для нашей страны железные дороги имеют особенно большое значение, т. к. их грузооборот в 2,3 раза больше грузооборота речного и морского транспорта, вместе взятых.

Все районы и области России связываются воедино железными дорогами, тем самым обеспечивая потребности в перевозках не только населения, но и промышленности и сельского хозяйства. В России железнодорожный транспорт – отрасль экономики, без которой не возможна бесперебойная работа всех экономических секторов.

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ведется подготовка студентов по направлению «Радиоэлектронные системы и комплексы». На протяжении ряда лет студенты данной специальности выполняют проектные работы, в которых исследуют использование средств радиотехнических устройств в различных областях человеческой деятельности. Так, по данной тематике выполнены работы, посвященные использо-

© Каргашин Е. К., Зайцева Е. М., 2018

ванию средств связи в работе банковских учреждений, в работе авиапредприятий [1, 2].

Постановка задачи

В рамках дисциплины «История радиотехники» возникла необходимость более подробно рассмотреть вопрос о системе сопровождения движения составов поездов на Российских железных дорогах.

Целью данной работы является систематизация материала и подготовка открытой лекции, которая будет использована в профориентационной работе с выпускниками школ города Ижевска на кафедре «Радиотехника».

В задачи исследования входило:

1) отбор и систематизация материала, размещенного в сети Интернет;

2) изучение основных принципов организации системы сопровождения движения поездов на железных дорогах;

3) анализ особенностей использования средств радиосвязи при организации движения поездов ОАО «РЖД»;

4) подготовка электронной лекции в форме презентации и выступление в рамках профориентационой работы с будущими абитуриентами ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;

Содержательная часть

На первом этапе выполнен информационный поиск в сети Интернет на официальных сайтах ОАО «РЖД», АО «Ижевский радиозавод». Результаты информационного поиска позволили изучить основные принципы системы сопровождения поездов.

На Российских железных дорогах широко используется комплексная система радиосвязи, в нее входят:

1) станционная радиосвязь (СРС);

2) поездная радиосвязь (ПРС).

Станционная радиосвязь предназначена для организации оперативного управления технологическими процессами на станции. Она обеспечивает связь между работниками станции и включает маневровую и горочную радиосвязь, а также радиосвязь персонала, обеспечивающего технологический процесс формирования составов на железнодорожных станциях, в том числе радиосвязь на пунктах технического обслуживания и пунктах коммерческого осмотра вагонов, радиосвязь списчиков вагонов и др.

Поездная радиосвязь применяется для служебных переговоров машинистов поездных локомотивов с поездным диспетчером в пределах

диспетчерского участка, с дежурными по станциям в пределах смежных перегонов, а также с машинистами других локомотивов, находящихся на одном и том же перегоне. Преимуществом радиосвязи по сравнению с проводной является то, что она дает возможность вести переговоры с работниками, находящимися в движении.

Радиосвязь в системе сопровождения подвижного состава работает в диапазоне гектометровых волн, при этом радиостанция обеспечивает работу в режиме одночастотного симплекса на одной из двух частот: 2,130 и 2,150 МГц. В диапазоне метровых волн радиостанция обеспечивает работу в режиме одно- и двухчастотного симплекса на любой из 171 рабочих частот в диапазоне от 151,725 до 156,000 МГц с разносом частот между соседними каналами 25 кГц.

Основными элементами в системе радиосвязи на ОАО «РЖД» являются:

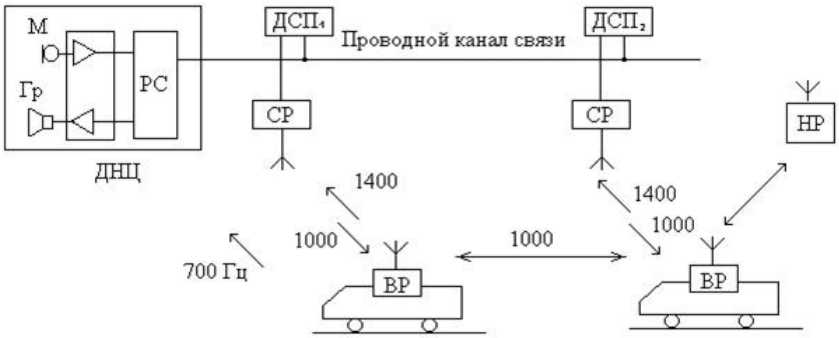
1. Стационарные радиостанции, устанавливаемые в помещении дежурного по станции (ДСП).

2. Локомотивные радиостанции.

3. Распорядительные станции в помещении поездного диспетчера.

Взаимодействие основных элементов средств радиосвязи при организации движения поездов представлено на рисунке.

Связь поездного диспетчера с машинистом локомотива на участке от распорядительной станции до промежуточного пункта осуществляется по каналу поездной диспетчерской связи, и от локомотива до промежуточного пункта по каналу поездной радиосвязи. Связь поездного диспетчера с дежурным по станции организуется с использованием поездной диспетчерской связи по воздушным и кабельным линиям. Эта связь относится к групповой телефонной связи, в которой имеется возможность подключения к линии телефонного аппарата одного промпункта или всех одновременно. В радиоканале поездной радиосвязи применен групповой вызов, при котором все локомотивные радиостанции вызываются частотой 1000 Гц. Для вызова поездного диспетчера – 700 Гц, а для вызова дежурного по станции используется частота 1400 ГЦ. Вызывная частота 2100 Гц может применяться как для вызова второго дежурного диспетчера на станции стыкования двух диспетчерских кругов связи, так и для вызова ремонтных подразделений.



Организация связи движения подвижного состава: М – микрофон, Гр – громкоговоритель, РС – радиостанция, ДНЦ – поездной диспетчер, ДСП – дежурный по станции, СР – стационарная радиостанция, ВР – возимая радиостанция, НР – носимая радиостанция

Электронная лекция разработана в программе Microsoft PowerPoint с использованием гиперссылок. Она включает: титульный слайд, оглавление, структурированное содержание и список используемых источников. Лекция содержит рисунки, фотографии радиостанций и другого оборудования связи, используемых в работе ОАО «РЖД».

Выводы

Из вышесказанного можно сделать вывод, что средства радиосвязи обеспечивают эффективную работу системы сопровождения подвижного состава на железных дорогах. Выпускники кафедры «Радиотехника» имеют возможность работать в перспективных отраслях железнодорожного, авиационного, морского и других видов транспорта.

Таким образом, лекция в виде презентации по дисциплине «История радиотехники» будет использована при подготовке студентов на кафедре «Радиотехника», а также для профориентационной работы с выпускниками школ и средних специальных учебных заведений города Ижевска и Удмуртской Республики.

Список литературы

1. *Шабалина, О. М.*. Использование средств телекоммуникации для организации работы платежных систем в Российской федерации [Электронный ресурс] / О. М. Шабалина, Е. М. Зайцева, В. А. Сидорина // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : электрон. науч. изд. : сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием. Ижевск, 22–23 апр. 2015 г. – Ижевск : ИжГТУ имени М. Т. Калашникова ; ИННОВА, 2015. – С. 370–376. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23400151_89684884.pdf (дата обращения: 15.11.2017).

2. *Сенаторов, Л. А.* Использование средств радиосвязи в организации воздушного движения [Электронный ресурс] / Л. А. Сенаторов, Е. М. Зайцева // Приборостроение в XXI веке – 2016. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XII Междунар. науч.-техн. конф. (Ижевск, 23–25 нояб. 2016 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2017. – С. 509–514.– URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29927295_30126626.pdf

3. Значение железнодорожного транспорта. Основные показатели работы железных дорог [Электронный ресурс] // Железнодорожный моделизм [Сайт]. – URL: http://www.modelzd.ru/ustroystvo-zhd/znachenie-zhd-transporta.html (дата обращения: 14.11.2017).

4. Назначение и принцип организации системы поездной радиосвязи [Электронный ресурс] // Мир электроники [Сайт]. – URL: http://www.icete.ru/pegibs-228-1.html (дата обращения: 15.11.2017).

E. K. Kargashin, student
E. M. Zaytseva, CSc in pedagogics, associate professor
E-mail: em_zaytseva@yahoo.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Organization of a System for Tracking the Movement of Rolling Stock on the Russian Railways Using Radio Communication Means

The article considers the basic principles of the organization of radio communications, used to accompany the rolling stock on the Russian railways. It is told by an example, how there is a connection between workers on the railway. And also what types of radio communication are there, and who uses them.

Keywords: radio communication, complex radio communication system, communication organization, types of radio communication on the railways.

УДК 621.389

А. Н. Копысов, канд. техн. наук, доц.
E-mail:kan_kan@istu.tu
А. А. Богатырева, магистрант
E-mail: anna.bogatyreva.1995@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Выбор методов анализа отказов аппаратуры систем безопасности, используемой в железнодорожном транспорте

Данная статья посвящена выбору методов анализа отказов. Эти методы могут быть применены для создания методики анализа и выявления отказов аппаратуры систем безопасности, используемой в железнодорожном транспорте.

Ключевые слова: безопасность движения, методы анализа отказов, причины, отказ, статистика.

Введение

Безопасность движения – одно из самых важных условий эксплуатации железной дороги, перевозок различных грузов и пассажиров. Для безопасности движения необходима исправность всего оборудования и механизмов железнодорожной автоматики. Проблема безопасности движения поездов всегда остается в центре внимания руководителей различных предприятий, ученых и работников. Интерес к этому связан с тем, что, во-первых, это сохранность жизни человека, во-вторых, влияние на окружающую среду, т. к. при различных авариях груз из вагонов попадает на землю, в воду или атмосферу, в-третьих, аварии влияют на ритмичность поставок, что приводит к материальной утрате.

Вопросы, связанные со случайными отказами аппаратуры, являются важными в проблематике обеспечения эффективной работы устройства. Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности какого-либо объекта [1]. Для обнаружения причин и механизмов отказов систем безопасноти в настоящее время целесообразно создавать методики анализа отказов, т. к. анализ отказов аппаратуры показывает, что примерно 40–45 % всех отказов происходит

© Копысов А. Н., Богатырева А. А., 2018

из-за ошибок, допущенных при разработке опытных образцов, 20 % и 30 % – из-за ошибок в процессе регулирования и эксплуатации серийно выпускаемых изделий соответсвенно. Поэтому целью данной статьи является поиск методов анализа отказов радиоэлектронной аппаратуры систем безопасности, используемой в железнодорожном транспорте.

Методы проведения анализа

Для того, чтобы методика анализа отказов максимально минимизировала риски изготавливаемой продукции, необходимо, чтобы методы могли решать следующие задачи:

1. Выявление отказа, т. е. какой дефект элемента, составной части или целого объекта в целом вышел из строя.
2. Изучение причин возникновения отказов.
3. Анализ критичности последствия отказа.
4. Предложения и рекомендации по внесению изменений конструкции для снижения рисков отказа.
5. Устранение отказа.

Для решения этих задач могут быть предложены следующие методы по анализу отказов.

Статистический метод по диаграмме Парето. Данный метод основывается на стабильности процесса. Главной задачей этого метода является получение, обработка различных показателей продукции производителей, а также обеспечение и сохранение качества процессов, установленных требованием [3]. Этот метод применятся на всех жизненных этапах цикла продукции для повышения и точности определения различных характеристик. Диаграмма Парето строится таким образом:

1. Выявляются причины, которые нужно решить, и выбирается промежуток времени для изучения данных причин.
2. Определяются типы данных для анализа, которые полностью дают характеристику проблемы.
3. Анализируют статистику и выполняют их группировку.
4. Строится столбчатая диаграмма по упорядочиванию данных по убыванию.
5. Вычисляются суммарные значения.
6. Выполняется анализ полученных результатов.
7. Разрабатывыются действия по устранению проблемы.

Метод «дерево отказов». Данный метод заключается в точном анализе причины отказов и подходов к их устранению, способствует

построению дерева отказов и неисправности состояний. Этот анализ применяют для каждой части элемента или объекта в целом. Главной задачей этого метода является выявление причин отказов, пока они реально не произошли [4]. Этот метод включает в себя следующие операции:

1. Выявить места, где обнаружен отказ.
2. Определить причины, используя различные технические данные и профессиональные оценки.
3. Проанализировать связи между элементами для решения проблемы.
4. Рассчитать статистическую вероятность возникновения отказа.
5. Искать методы для устранения причины отказа.
6. Устранить отказ.

Индуктивный метод. В данном методе анализ происходит относительно простых отказов, которые могут быть четко определены, а их причины могут быть прослежены [5]. Алгоритм данного метода включает в себя следующие операции:

1. Устанавливают наименьший уровень разукрупнения, с которого будут начинать анализ отказов.
2. Составляют список возможных отказов для каждого совпавшего элемента.
3. Оценивают для общих отказов категорию тяжести последствия.
4. Выделяют такие отказы, которые наиболее критичны.
5. Определяют наличие и оценивают достаточность методов для выявления и контроля отказов.
6. Вводят меры по их устранению.
7. Оценивают их эффективность.
8. Устраняют отказ.

Дедуктивный метод. Данный метод применим для сложных и многофункциональных объектов, отказы которых сложно определить и устранить сразу [5]. Алгоритм данного метода включает следующие операции:

1. Упорядочивают все функции, которые выполняет объект.
2. Определяют возможные отклонения данной функции.
3. Оценивают тяжесть и ущерб отказа.
4. Строят дерево отказов.
5. Выделяют одиночные элементы, которые приводят к нарушению изделия.

6. Анализируют вероятность их отказов и рассчитывают показатели критичности данного отказа.

7. Устраняют отказ.

Комбинированный метод. Этот метод применим для сложных объектов. Включает в себя элементы индуктивного и дедуктивного методов [5].

Экспертный метод. Данный метод используют в том случае, когда отсутствуют не только статистические данные по отказам, но и сами математические модели. То есть этот метод реализуем тогда, когда исходная база недостаточна для получения решения. Этот метод может быть как индивидуальным, так и коллективным. Считается, что мнение коллективного решения будет более надежным, чем мнение одного участника. Каждый участник опирается на свой опыт и профессионализм, которые в дальнейшем ведут к принятию решения и новых методов для получения результата. Для того чтобы ошибки были минимальными, нужно, чтобы мнение всех экспертов было однозначным, объективным и реализуемым [2]. Основными целями данного метода являются:

1. Оценка развития события и их значимость;
2. Анализ всех результатов экспертов;
3. Составление плана работы.

Заключение

Подводя итог, следует сказать, что на сегодняшний день существует большое количество аппаратур систем безопасности железнодорожного транспорта, созданных различными производителями, которые не всегда эффективно решают вопросы, связанные с надежностью систем. При серийном производстве могут выявиться различной степени отказы, приводящие к неутешительным результатам. Поэтому в данной статье описаны различные методы анализа отказов, позволяющие систематично решать вопросы, с которыми сталкиваются производители изготавливаемой продукции, минимизировать риски и создавать более качественную продукцию. В системе безопасности, используемой в железнодорожном транспорте, в дальнейшем будут использоваться такие методы, как индуктивный, дедуктивный и комбинированный.

Список литературы

1. *Белов, П. Г.* Теоретические основы системной инженерии безопасности. – М. : Безопасность, 1996. – 427 с.

2. *Батаев, В. А*. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей / В. А. Батаев, А. А. Батаев, А. П. Алхимов. – М. : Флинта, 2007. – 224 с.

3. *Антонов, А. В*. Системный анализ : учеб. для вузов. – М. : Высш. шк., 2004. – 454 с.

4. *Томаков, В. И.* Прогнозирование техногенного риска с помощью «Деревьев отказов» : учеб. пособие. – Курск, 1997. – 99 с.

5. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и кри- тичности отказов – М. : Изд-во Стандартинформ, 2008. – 154 с.

A. N. Kopysov, CSc in engineering, associate professor
E-mail:kan_kan@istu.tu
A. A. Bogatyreva, magister student
E-mail: anna.bogatyreva.1995@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Choice of Methods for Analyzing Failures in the Equipment of Safety Systems Used in Railway Transport

This article is devoted to the choice of methods for analyzing failures. These methods can be used to create a technique for analyzing and detecting equipment failures of safety system used in railway transport.

Keywords: traffic safety, methods of analysis of failures, causes, refusal, statistics

УДК 621.396.61

В. Н. Похващев, канд. техн. наук, ст. преподаватель
Н. Т. Хакимов, канд. техн. наук, зам. начальника кафедры
Р. И. Комарский, курсант
E-mail: raf.niz@yandex.ru
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Устройство беспроводного обмена информацией между выносным индикатором и станцией радиотехнической разведки

В статье рассматривается устройство для беспроводного обмена информацией между выносным индикатором и станцией радиотехнической разведки. Предложены варианты его применения в практической деятельности специалистов радиоэлектронной борьбы Военно-воздушных сил (РЭБ ВВС).

Ключевые слова: радиоэлектронная борьба (РЭБ), радиотехническая разведка (РТР), противовоздушная оборона (ПВО), радиолокационная станция (РЛС), облучение, сверхвысокая частота (СВЧ).

Введение

Как известно, РЭБ – один из видов боевого обеспечения современных боевых действий. Основной целью РЭБ является снижение эффективности боевого применения радиоэлектронных средств противника путем постановки активных и пассивных помех, а также проведения других мероприятий в интересах РЭБ. Опыт современных локальных войн и вооруженных конфликтов свидетельствует о все большем применении техники РЭБ на полях сражений. Однако необходимо отметить, что, следуя законам диалектики единства и борьбы противоположностей, на любое действие находится противодействие. Военная сфера радиоэлектроники не является исключением в этом смысле.

Чем больше развивается техника РЭБ, тем больше совершенствуются способы борьбы с помехами. В целом эффективность применения техники РЭБ напрямую зависит от качественного информационного обеспечения. Таким образом, одной из ключевых составляющих РЭБ является радиотехническая разведка (РТР). Сущ-

© Похващев В. Н., Хакимов Н. Т., Комарский Р. И., 2018

ность ее заключается в получении сведений о противнике путем обнаружения и анализа принятых сигналов его радиоэлектронных средств (РЭС) [1].

Сведения из теории

В настоящее время РЭБ ведется во всех сферах в воздухе, на море и на земле. Техника РЭБ воздушных судов военного назначения объединена в комплексы обороны. В качестве средства РТР в составе указанных комплексов современных воздушных судов применяется станция предупреждения об облучении СПО-15 «Береза». Она располагается на борту летательного аппарата и предназначена для оповещения экипажа об облучении самолета РЛС зенитно-ракетных и зенитно-артиллерийских комплексов противника, бортовыми РЛС истребителей и ракет с головками самонаведения.

Станция выполняет следующие задачи [2]:

1) устанавливает факт облучения противником самолета наземными и бортовыми РЛС, работающими в частотном диапазоне станции;

2) определяет пеленг, тип и режим работы РЛС противника, облучающих самолет;

3) выбирает из всех облучающих РЛС главную, т. е. входящую в состав наиболее опасного средства противовоздушной обороны (ПВО) противника;

4) ориентировочно оценивает дальность до средства ПВО, облучающего самолет;

5) индицирует момент пуска ракеты и оценивает динамику ее сближения с самолетом.

СПО-15 представляет собой амплитудный пеленгатор с четырьмя блоками азимутальных антенн и двумя блоками угломестных антенн с устройствами преобразования, усиления и обработки принятых сигналов. Информация об РЛС противника, облучающих самолет, отображается на индикаторе боевой обстановки. Внешний вид индикатора представлен на рис. 1.

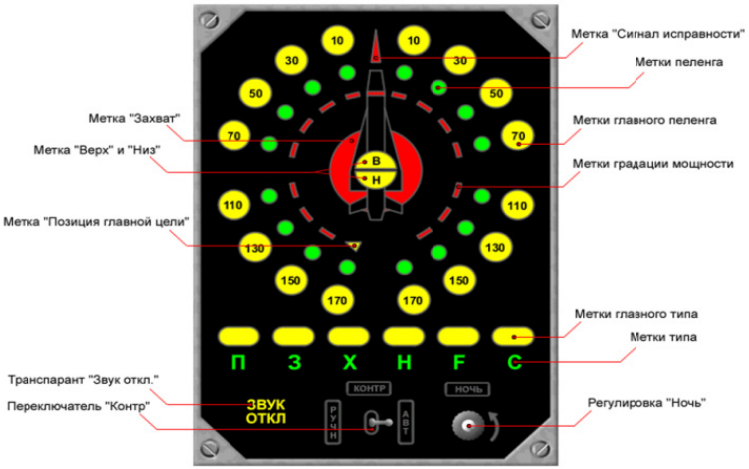


Рис. 1. Внешний вид индикатора боевой обстановки СПО-15

Постановка задачи

Конструктивные особенности индикатора боевой обстановки СПО-15 обуславливают серьезные требования к уровню подготовки летного состава по безошибочному восприятию информации о текущей радиоэлектронной обстановки.

Сущность процесса восприятия информации заключается в следующем. Пилот, глядя на экран индикатора, по зажиганию различных светодиодов узнает, где относительно самолета (азимут, дальность, угол места) и какое именно средство управления оружием противника облучает воздушное судно в текущий момент времени. Исходя из этого, пилот (в случае ручного управления) или бортовая вычислительная машина (в случае автоматического управления) решает, применять средства РЭБ либо выполнять противоракетный (противозенитный, противоистребительный) маневр.

Неправильное восприятие информации влечет за собой неправильное решение, что, в свою очередь, приведет к поражению самолета и гибели экипажа.

В связи с этим целью работы является повышение эффективности обучения военных специалистов, применяющих станцию РТР, путем моделирования различных тактических эпизодов радиоэлектронного конфликта воздушного судна и средства ПВО противника с одновременным охватом как можно большего количества обучаемых.

Для достижения данной цели была поставлена задача разработки устройства беспроводного обмена информацией между выносным индикатором боевой обстановки СПО-15 и штатной станцией радиотехнической разведки воздушного судна.

Описание выполненной работы

На первом этапе решения поставленной задачи необходимо сформулировать требования к разрабатываемому устройству. А именно:

1. Мощность устройства передачи информации должна быть достаточной для обеспечения необходимого уровня сигнала на входе приемного устройства.

2. Приемное устройство должно обладать достаточными свойствами чувствительности и избирательности.

3. Устройства передачи и приема информации должны удовлетворять требуемой скорости передачи сигналов, т. к. работа канала информационного обмена должна осуществляться в масштабе реального времени.

4. Методы кодирования информации и декодирования сигналов должны обладать достаточными свойствами помехозащищенности и избыточности [3].

На втором этапе решения поставленной задачи был создан выносной индикатор боевой обстановки станции СПО-15 в увеличенном масштабе 1:30. В дальнейшем было разработано устройство беспроводной передачи информации между станцией РТР и предложенным выносным индикатором [4].

Обобщенная структурная схема канала информационного обмена между выносным индикатором и станцией СПО-15 представлена на рис. 2.

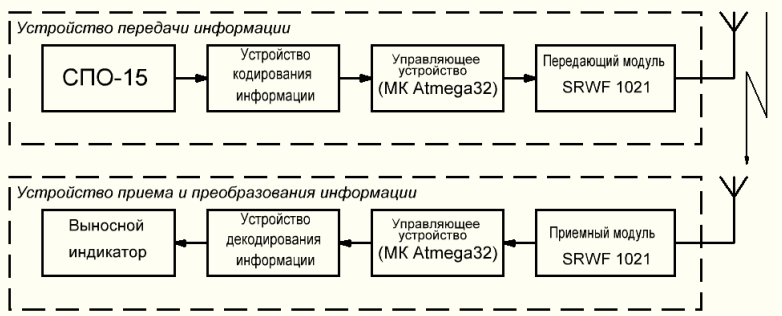


Рис. 2. Обобщенная структурная схема канала информационного обмена между выносным индикатором и станцией СПО-15

Разработанный канал информационного обмена представляет собой совокупность следующих устройств:

1. Устройство передачи информации, включающее в себя:

1) станцию предупреждения об облучении СПО-15, являющуюся источником информации о РЭО;

2) устройство кодирования информации;

3) управляющее устройство на базе микроконтроллера ATmega32;

4) передающий радиомодуль SRWF 1021;

2. Устройство приема и преобразования информации, включающее в себя:

1) приемный радиомодуль SRWF 1021;

2) управляющее устройство на базе микроконтроллера ATmega32;

3) устройство декодирования информации;

4) выносной индикатор.

Способ размещения разрабатываемого устройства беспроводного обмена информацией в составе станции РТР СПО-15 представлен на рис. 3.

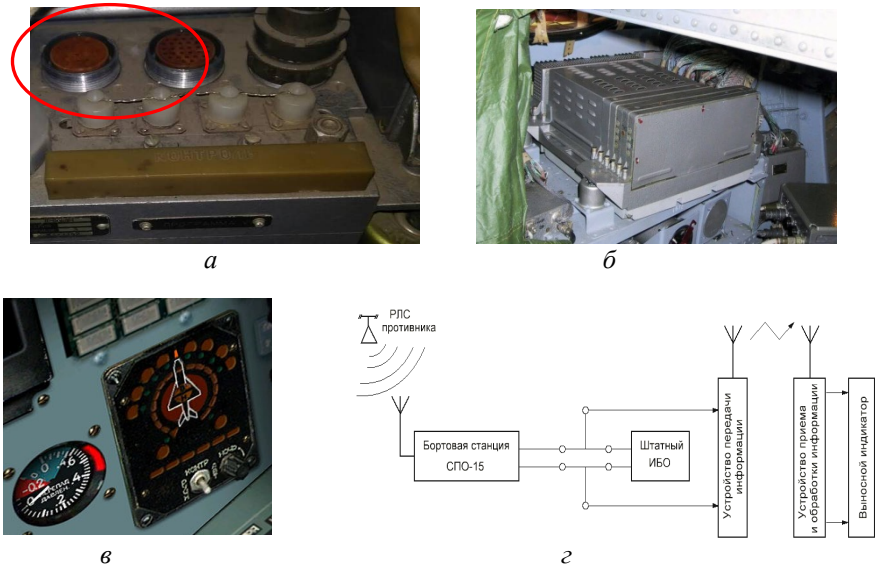


Рис. 3. Размещение разрабатываемого устройства в составе СПО-15: *а* – блок станции СПО-15, откуда снимается информация, которую необходимо передать на выносной индикатор; *б* – этот же блок, вид сбоку; *в* – штатный индикатор боевой обстановки; г – схема включения разрабатываемого устройства в цепь

Следующим этапом решения поставленной задачи была разработана принципиальная схема устройства передачи информации, представленная на рис. 4.

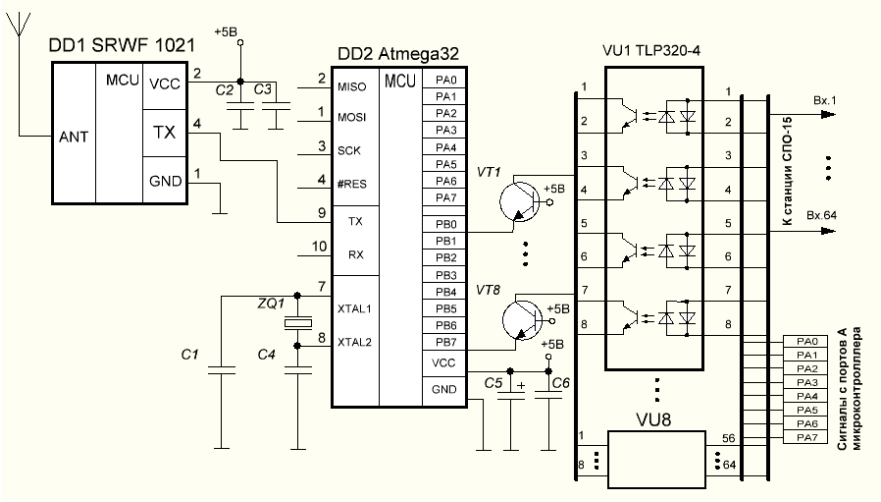


Рис. 4. Принципиальная схема устройства передачи информации

Принцип работы устройства заключается в следующем. Информация от СПО-15, по запросу микроконтроллера (путем подачи питающих напряжений на PORT A – 25 раз/сек) поступает через шину данных на PORT B микроконтроллера. Для этого все контакты широтного разъема (ШР) штатного индикатора станции СПО-15 разделены функционально по 8. 25 раз в секунду микроконтроллер открывает управляющие транзисторы, тем самым осуществляя опрос первой восьмерки информационных контактов, и так далее по циклу.

Вся информация, поступившая на контакты PORT B микроконтроллера, преобразуется в виде двоичной последовательности данных и через выход TX передается на вход приемопередающего модуля DD1 SRWF 1021 и далее через антенну излучается в пространство на частоте 868 МГц.

Конденсаторы C1 и C2 предназначены для фильтрации питающего напряжения от высокочастотных пульсаций. Конденсаторы C3 и C4 задают режим работы кварцевого резонатора ZQ1, от которого стабилизируется внутренний тактовый генератор микроконтроллера.

На заключительном этапе была разработана принципиальная схема устройства приема и обработки информации, представленная на рис. 5.

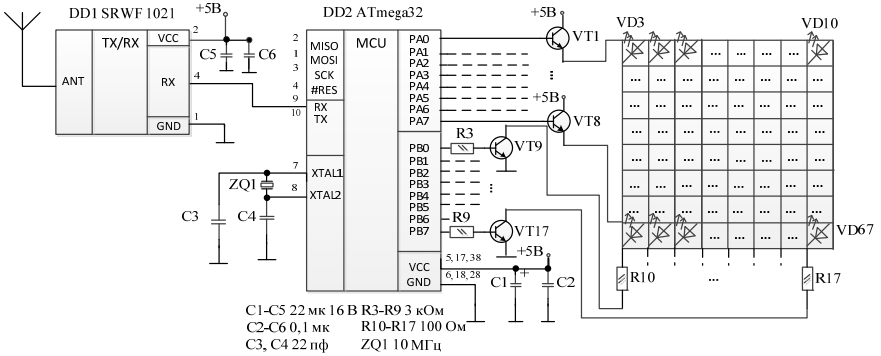


Рис. 5. Принципиальная схема устройства приема и обработки информации

Сущность работы устройства приема и обработки информации заключается в следующем. Принятый сигнал с выхода DD1 через разъем RX поступает на вход микроконтроллера DD2 ATmega32. На выходе микроконтроллера на выводах PORT A и PORT B появляются сигналы, соответствующие наличию или отсутствию напряжения (0 или 1). Управляющие напряжения поступают на транзисторы. В зависимости от сигналов транзисторы находятся либо в закрытом, либо в открытом состоянии. В открытом состоянии напряжение проходит и загорается соответствующий светодиод. Резисторы R10–R17 предназначены для ограничения напряжения, поступающего на светодиоды (до ≈2.2В).

Конденсаторы C1 и C2 предназначены для фильтрации питающего напряжения от высокочастотных пульсаций, возникающих при работе микроконтроллера. Конденсаторы C3 и C4 задают режим работы кварцевого резонатора ZQ1.

Выводы

Таким образом, в результате было разработано устройство беспроводного обмена информацией между выносным индикатором и станцией радиотехнической разведки со следующими техническими характеристиками:

Вид модуляции	ЧМн*
Напряжение питания	4,5…5,5 В
Рабочая частота	868 МГц

Чувствительность приемника	–113 дБ
Скорость передачи данных	9,6 кбит/с
Дальность связи	до 400 м
Рабочая температура	–25…75 °С
Размер корпуса индикатора	400×300×100 мм
Масса	1,8 кг

Внешний вид выносного индикатора представлен на рис. 6.

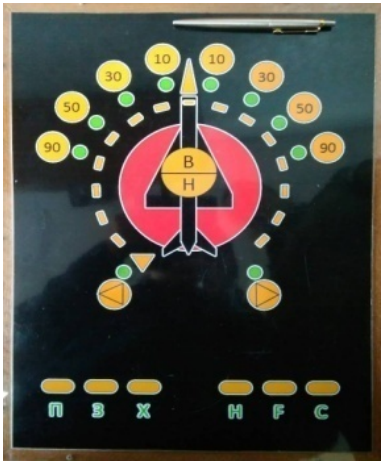


Рис. 5. Внешний вид выносного индикатора

Предлагаемое устройство целесообразно применять в качестве обучающего стенда для подготовки летного состава эффективному применению бортовых средств РЭБ на основании информации о текущей радиоэлектронной обстановке, получаемой с индикатора СПО-15. Увеличенный индикатор боевой обстановки позволит доступно и наглядно объяснить большой аудитории алгоритм действий летного состава в различных тактических эпизодах боевой обстановки и определить наиболее рациональный вариант применения бортовых средств РЭБ.

Кроме того, применение данного устройства в ходе предполетной подготовки авиационной техники к выполнению поставленных задач позволит снизить вредные факторы нахождения инженерного состава в поле СВЧ при проверке работоспособности станции.

Благодарности

Один из авторов, Р. И. Комарский, выражает благодарность профессорско-преподавательскому составу 53-й и 203-й кафедр ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) за помощь в подготовке, а также своему дяде Комарскому Андрею Геннадьевичу и учительнице Богачёвой Нине Васильевне, когда-то впервые открывшим для него занимательный мир электроники.

Список литературы

1. *Палий, А. И.* Радиоэлектронная борьба. – М. : Воениздат, 1989. – 272 с.

2. *Евдокимов, В. В.* Самолетная станция предупреждения об облучении СПО-15. – Иркутск : ИВВАИУ, 1990. – 54 с.

3. *Комарский, Р. И.* Устройство беспроводной передачи информации на выносной индикатор средств НРТР / Р. И. Комарский, В. Н. Похващев // Сборник статей по материалам IV Межвузовской научно-практической конференции курсантов и слушателей. – Воронеж : Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – С. 11–16.

4. *Головин, О. В.* Радиоприемные устройства. – М. : Телеком, 2004. – 384 с.

V. N. Pokhvashchev, CSc in engineering, senior lecturer
N. T. Khakimov, CSc in engineering, vice-head of department
R. I. Komarskij R.I., cadet,
E-mail: raf.niz@yandex.ru
Russian Air Force Military Academy

Wireless Data Transmission Device for Information Exchange between a Remote Indicator and a Signal Intelligence Station

This article deals with the creation of a wireless information device for data exchange between a remote indicator and signal intelligence station. The advantages of implementing the device in the Military Academy training, as well as its use in flight preparation and maintenance in Air Force units of the Russian Air Force are considered.

Keywords: electronic warfare (EW), air defense, Signal Intelligence, radar, radiation, ultrahigh frequency.

УДК 378.147.88

В. А. Сидорина, канд. пед. наук, доц.
E-mail: vasidorina@mail.ru
Д. А. Пасынкова, студент
Е. Д. Урсегова, студент
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Использование облачных технологий в проектной деятельности студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Рассматриваются вопросы использования проектной деятельности в учебном процессе для студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» с применением современных облачных технологий.

Ключевые слова: проектная деятельность студентов, учебный процесс, применение современных облачных технологий, система Google Docs.

Введение

В новых требованиях к освоению образовательных программ большое внимание уделяется формированию общекультурных и общепрофессиональных компетенций, которые характеризуют будущую профессиональную деятельность выпускников университета. Компетентностный подход в образовании позволяет реализовать различные инновационные методы, к которым относится и проектная технология.

Проектная деятельность является одним из важных видов учебной деятельности студентов старших курсов технического университета. Знакомятся с проектами еще в школе. В университете такую работу необходимо включать в учебный процесс, начиная с первого курса. Именно метод проектов позволяет активизировать деятельность студентов, сделать учебный процесс личностно значимым. Для формирования информационной компетентности при выполнении проектных работ студентам необходимо грамотно находить и структурировать информацию, используя информационные ресурсы сети Интернет и специализированные базы данных в профессиональных целях [1, 2].

© Сидорина В. А., Пасынкова Д. А., Урсегова Е. Д., 2018

Постановка задачи

Цель проектного обучения состоит в том, что студенты, работая в группах, преобретают коммуникативные умения, могут пользоваться приобретенными знаниями для решения научных и технических задач, развивают исследовательские умения. Для студентов важно умение выявить проблему, собрать информацию, провести наблюдение, эксперимент, сделать анализ и обобщение [3]. Все это пригодится в дальнейшей профессиональной работе.

На кафедре «Радиотехника» в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова в 2017 году стали использоваться новые элементы в проектной деятельности студентов. Это средства облачной технологии, которые позволяют создавать и использовать информационные образовательные ресурсы с возможностью совместного доступа к ним студентов и преподавателей.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим проект, разработанный студентами по разделу «Базы данных и системы управления базами данных» дисциплины «Информатика». Проект был разработан по методике с использованием системы Google Docs [4] – это бесплатный онлайн-сервис компании Google (https://docs.google.com), который обладает всеми необходимыми функциями для создания текстовых, табличных документов, баз данных, презентаций, рисунков. В этой системе находится онлайновое облачное хранилище файлов с функцией обмена.

В результате разработки проекта было проведено практическое занятие по дисциплине «Информатика» для студентов первого курса направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Формирование практических умений работы осуществлялось с помошью СУБД LibreOffice Base. Следует отметить, что сервис Google Docs на занятии использовался впервые.

Для работы на занятии всем студентам группы необходимо было предварительно зарегистрироваться в google. После этого был создан текстовый документ со всеми аккаунтами и открылся доступ каждому студенту для чтения заданий Google Docs.

Тема занятия: «Базы данных и системы управления базами данных». Структура занятия:

1. Введение.
2. Основная часть.
3. Индивидуальная работа студентов.
4. Работа в группах.

5. Подведение итогов.

В ходе занятия предлагались следующие задания.

Задание для индивидуальной работы:

а) зайдите в свою почту google;

б) в верхнем правом углу экрана нажмите на кнопку «Сервисы» и выберете «Диск»;

в) изучите интерфейс открывшегося окна;

г) найдите документы, которые позволяют создавать виртуальный офис Google Docs;

д) создайте текстовый документ, в котором напишите определение терминов «база данных» и «система управления базой данных», откройте доступ для редактирования соседу справа (команда Файл->Совместный доступ), дождитесь, когда сосед слева откроет вам доступ для редактирования своего текстового документа, и проверьте ответ на вопрос.

Задание для работы в группах.

Студенты делятся на группы по 3-4 человека. В каждой группе определяются лидер, эксперт, критик. Лидер занимает руководящую позицию, организует совместную работу группы. Эксперт следит за выполнением работы, формулирует вопросы по предлагаемой информации. Критик формирует оценочное суждение по результатам работы группы, сравнивает работу группы с работой других групп.

Первая часть (теоретическая работа).

Необходимо совместно подготовить презентацию, слайды которой будут содержать ответы на поставленные теоретические вопросы по теме «Базы данных и системы управления базами данных». При подготовке презентации можно использовать любые источники информации (лекции, методические пособия, литературу, сеть Интернет).

Вторая часть (практическая работа).

По конкретной предметной области нужно разработать структуру таблиц базы данных, ключевые поля и установить связи между таблицами.

В конце занятия при подведении итогов студенты определили, какая часть работы была для них самая трудная и самая легкая, какие проблемы возникали при выполнении заданий.

Содержательная часть представленного занятия способствовала формированию первоначальных умений студентов в проектировании структуры базы данных. На этом занятии студенты закрепили и преобрели новые знания в области обработки информации, навыки рабо-

ты с системой управления базами данных; в соответствии с общепрофессиональными компетенциями: способностью владения основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, способностью иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях, осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ .

Выводы

В дальнейшем планируется продолжить работу по проектной деятельности с использованием облачных технологий для проведения лекционных и практических занятий у студентов первого курса направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Информатика».

Сочетание как традиционных, так и новых способов и методов обучения является важнейшим условием успешной реализации образовательной программы.

Список литературы

1. *Сидорина, В. А.* Особенности педагогической технологии управления развитием информационной компетентности студентов в техническом вузе / В. А. Сидорина, Е. М. Зайцева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2012. – № 7. – С. 194–196.

2. *Сидорина, В. А.* Использование новых форм лекций в учебном процессе для студентов радиотехнического профиля / В. А. Сидорина, А. О. Михайлова // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – 2016. – С. 478–483.

3. *Рахманова, Ю. К.* Проектная деятельность в техническом вузе / Ю. К. Рахманова, С. И. Каргапольцева // Молодой ученый. – 2016. – № 11. – С. 1527–1531.

4. *Дронова, Е. Н.* Использование сервиса Google Docs для организации группой работы на примере занятия «Введение в базы данных» // Современная техника и технологии. – 2015. – № 4 [Электронный ресурс]. – URL: http://technology.snauka.ru/2015/04/6459 (дата обращения: 14.11.2017).

V. A. Sidorina, CSc in pedagogics, associate professor
E-mail: vasidorina@mail.ru
D. A. Pasynkova, student
E. D. Ursegova, student
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Use of Internet Cloud Technologies in Project Activities of Students on the Direction of "Info-Communication Technologies and Communication Systems"

The article is devoted to the project activities in the educational process for students of direction "info-communication technologies and communication systems" with the use of modern Internetcloud technologies.

Keywords: Project activities of students, educational process, application of modern cloud technologies, Google Docs.

УДК 378.147.31

В. А. Сидорина, канд. пед. наук, доц.
E-mail: vasidorina@mail.ru
П. В. Салтыков, студент
Г. И. Ильязова, студент
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Организация самостоятельной работы студентов радиотехнического профиля с использованием технологии скринкастинга

Рассматриваются вопросы организации самостоятельной работы студентов радиотехнического профиля с использованием новой в образовательном процессе технологии скринкастинга, которая способствует повышению качества подготовки студентов.

Ключевые слова: самостоятельная работа студентов, образовательный процесс, технология скринкастинга.

© Сидорина В. А., Салтыков П. В., Ильязова Г. И., 2018

Введение

Самостоятельная работа студентов радиотехнического профиля является обязательным элементом образовательной деятельности. Именно самостоятельная работа развивает творческий подход, повышает ответственность при решении задач учебного и профессионального уровня, в том числе и в научно-исследовательской деятельности.

Здесь важно определить мотивацию, которая является эффективным способом улучшить процесс обучения. Мотивы являются движущими силами процесса обучения и усвоения знаний [1, 2]. У студентов младших курсов мотивация к самостоятельной работе проявляется в понимании полезности и важности выполняемой работы в плане расширения кругозора, эрудиции. Результаты самостоятельной работы помогают лучше понять лекционный материал, лабораторные работы. На старших курсах формирование мотивации происходит через стремление к самостоятельному исследованию в плане профессиональной подготовки. Следует отметить, что деление на «младшие» и «старшие» курсы условно, все зависит от творческого начала в самостоятельной работе студента, его индивидуальной склонности и способности. От формирования мотивационной сферы зависит личная активность студента и успешность его обучения.

Постановка задачи

Самый действенный способ повысить мотивацию студента – это заинтересовать своим предметом, чтобы большинство студентов с удовольствием ходили на занятия, занимались саморазвитием. Для этого надо активно использовать не только традиционные, но и инновационные формы обучения. К такой форме относится технология скринкастинга – это технология создания экранного видео для разработки электронных обучающих материалов [3].

Скринкаст – цифровая видеозапись информации, выводимой на экран компьютера. Существует ряд программ, которые позволяют работать в технологии экранного видео, к ним относится и программа Camtasia Studio. По нашему мнению, это одно из лучших средств для подготовки видеопрезентаций и интерактивных учебных блоков при изучении различных учебных материалов. Эта программа дает возможность записывать в видеофайл все действия на экране компьютера с одновременной записью комментариев через микрофон. Просматривая такой видеоролик, студенты имеют возможность изучать материал в индивидуальном темпе, многократно повторяя экранное видео и де-

лая остановки на сложных моментах. И самое главное – все увиденное и услышанное можно сразу применять в своей работе.

С развитием информатизации в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова на кафедре «Радиотехника» стали активно использоваться средства мультимедиа при подготовке демонстрационных и методических материалов в учебном процессе [1, 2]. Это позволяет успешно реализовать чередование различных форм деятельности. Используя слайды в лекционном материале, преподаватели могут переключить внимание студента, например, предложить задание для самостоятельной работы, попросить студентов высказать свою точку зрения. Кроме того, иллюстративный материал в виде презентации студенты могут использовать при выполнении индивидуальных проектов, написании курсовой работы. Проведенный нами опрос показал, что преподаватели и студенты знают и другие новые формы обучения, которые используются еще довольно редко.

Результаты и их обсуждение

В 2017 г. на кафедре «Радиотехника» были разработаны видеопрезентации для изучения программирования на алгоритмическом языке Си++ в интегрированной среде разработки Visual Studio. Был создан ряд видеороликов с помощью программы Camtasia Studio, таких как «Первая программа на языке Си++ в среде Visual Studio», «Написание программы с использованием условного оператора на алгоритмическом языке Си++», «Работа с циклическими конструкциями в Си++», «Пример работы с массивами на языке Си ++ в среде Visual Studio». Создание видеороликов именно на эти темы обусловленно тем, что материал, представленный в них, содержит базовую информацию, необходимую для того, чтобы начать программировать на языке Си++. Естественно, при создании видеороликов возникли некоторые трудности, такие как отсутствие профессиональной аппаратуры для создания максимально качественного контента, необходимость в освоении нового програмного обеспечения. Также затруднения были в том, чтобы прокомментировать через микрофон действия на экране компьютера грамотно, четко, понятно, чтобы информация воспринималась легко, не утомляя слушателя. Для этого приходилось проводить много тренировок, создавая множество дублей. Созданный видеоматериал был выложен в сети Интернет на популярном видеохостинге YouTube и находится в свободном доступе.

Выводы

В дальнейшей работе планируется использование технологии скринкастинга не только в самостоятельной работе студентов, но и на лекционных, практических занятиях, например, в бинарных лекциях (преподаватель-студент) или в лекциях с заранее заданными ошибками [4], где студенты могли создавать небольшие видеоролики по отдельным блокам, темы которых заранее предлагаются преподавателем. Проведение таких инновационных типов занятий будет способствовать успешной реализации новых образовательных задач и повышению качества подготовки студентов радиотехнического профиля.

Список литературы

1. *Сидорина, В. А.* Проектирование методического обеспечения в системе непрерывного профессионального образования на основе тезаурусного подхода : дис. … канд. пед. наук : 13.00.08 / Сидорина Вера Анатольевна ; ИжГТУ. – Ижевск, 2003. – 188 с.

2. *Копысов, А. Н.* К вопросу об организации научно-исследовательской работы студентов младших курсов в техническом университете/ А. Н. Копысов, В. А. Сидорина, Е. М. Зайцева // Инновации в образовании : электрон. науч. изд. : сб. материалов науч.-метод. конф. преподавателей и сотрудников ИжГТУ имени М. Т. Калашникова (Ижевск, 13–15 апр. 2016 г.). – Ижевск : ИННОВА, 2016. – С. 75–78.

3. *Шишлина, Н. В.* Дистанционное обучение: кадровый потенциал // Новые образовательные технологии в вузе (НОТВ-2014) : XI Междунар. науч.-метод. конф., г. Екатеринбург, УрФУ, 19–21 февр. 2014 г. – URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/24723/1/notv-2014-190.pdf (дата обращения: 11.11.2017).

4. *Сидорина, В. А.* Использование новых форм лекций в учебном процессе для студентов радиотехнического профиля / В. А. Сидорина, А. О. Михайлова // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства : сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. – Ижевск :Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. – С. 478-483.

V. A. Sidorina, CSc in pedagogics, associate professor
E-mail: vasidorina@mail.ru
P. V. Saltykov, student
G. I. Iljazova, student
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Organization of Independent Work of Students in Radio Engineering Using the Screencasting Technology

The article is devoted to the organization of independent work of students in radio engineering with the use of new in educational process the technology of screencasting, which contributes to the improvement of quality of preparation of students.

Keywords: independent work of students, educational process, technology of screencasting

УДК 629.7.05

М. В. Симонов, аспирант
E-mail: simonov_marat@mail.ru
К. В. Шишаков, канд. физ.-мат. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Моделирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем на вертикальных траекториях для парашютного спуска

Рассматривается тема навигации парашютного спуска на вертикальных траекториях. Предложена модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы, которая позволяет решать задачи угловой ориентации и позиционной навигации для данных условий.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, навигация, моделирование, парашютный спуск.

Введение

В задачах десантирования на вертикальных траекториях растет интерес к сбрасыванию грузов с обеспечением их доставки в требуемую область приземления. Разработка и внедрение таких систем представляют практическую важность для обеспечения грузами труднодоступных горных или северных районов, для решения задач МЧС при оказании помощи пострадавшим в результате стихийных бедствий или техногенных катастроф и в других областях применения.

Постановка задачи

В настоящее время большинство точных сбрасываний проводится за счет пролета над расчетной точкой десантирования. Такая точка рассчитывается на основе скорости и направления ветровых потоков,

© Симонов М. В., Шишаков К. В., 2018

скорости полета воздушного судна, высоты сбрасывания и баллистических характеристик парашютной системы.

Сброс груза осуществляется с транспортного самолета через задний люк с помощью вытяжного парашюта. Часто используется парашют-крыло – планирующий парашют, за счет формы купола обладающий достаточно высоким аэродинамическим качеством. Десантирование происходит на высоте от 500 до 10000 м, скорость самолета при этом обычно составляет от 260 до 400 км/ч. Требуемая точность приземления груза оценивается в 100 м.

Десантирование с большой высоты с немедленным раскрытием парашюта может приводить к горизонтальному смещению груза на достаточно большие расстояния. Поэтому здесь следует учитывать множество факторов, влияющих на точность десантирования: погодные условия, изменение скорости и направление ветра на разных высотах, различия в динамике раскрытия отдельных парашютов, износ парашютов, различия в изготовлении парашютов и другие.

В таких задачах, кроме оценки точки пассивного десантирования, возникает необходимость в использовании систем активного десантирования, предполагающих управление траекторией парашютного спуска.

В качестве исходных данных можно принять, что скорость ветра при десантировании достигает до 15 м/с. Поэтому скорость движения парашютной системы может достигать 20 м/с и более.

Решение задачи

Для определения и контроля собственного местоположения система использует бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС), GPS-навигацию и систему наведения. Кроме этого, система принимает данные с бортовых датчиков, таких как датчик скорости полета, датчик давления, датчик температуры, навигационные сенсоры, помогающие рассчитать потоки воздуха.

Активное управление спуском парашюта обеспечивается с помощью натяжения стропов, что позволяет изменять углы атаки и скольжения при обтекании купола потоком воздуха и таким образом управлять положением спускаемого объекта по тангажу, крену и рысканию.

Для того чтобы сохранить целостность груза при посадке, требуется, чтобы максимальная скорость снижения перед приземлением была не более 11 м/с, а ее горизонтальная составляющая не превышала 10 м/с.

В настоящее время точное сбрасывание быстро развивается и, по всей видимости, в будущем станет все более распространенным.

Целью статьи является построение модели БИНС на вертикальных траекториях для парашютного спуска. В отличие от других навигационных систем БИНС имеет высокое быстродействие, что дает потенциальное преимущество при организации контуров активного управления парашютным спуском (и по быстродействию, и по устойчивости). С другой стороны, нарастающая во времени погрешность БИНС требует его комплексирования с GPS или другими навигационными или измерительными системами. Однако в отдельных случаях спуска с высоким уровнем непреднамеренных радиопомех от такого комплексирования придется отказаться, переходя к автономному режиму работы БИНС.

В общем случае при моделировании БИНС выделяют 3 режима:

1) режим начальной выставки – определяются требуемые для запуска второго режима начальные положения, углы и начальные скорости;

2) рабочий режим БИНС – режим измерения во времени приращений углов, координат и скоростей;

3) режим периодического комплексирования с другими измерительными системами – для коррекции погрешностей БИНС.

Так как парашютный спуск связан с полетом самолетов, поэтому его модель определим в рамках общей теории БИНС, разработанной для полета самолетов [1]. Здесь традиционно будем использовать географическую систему координат $OX_gY_gZ_g$ и связанную со спускаемым объектом приборную систему координат $OXYZ$.

Для системы координат $OX_gY_gZ_g$ по ГОСТ 20058–80 ось OX_g направлена на север по касательной к географическому меридиану, ось OZ_g – по касательной к параллели на восток, ось OY_g направлена в сторону, противоположную действию силы тяготения, вершина O совмещена с центром масс объекта и перемещается вместе с ним.

Для системы координат $OXYZ$ ось OX направлена по направлению движения (продольная ось объекта), ось OZ – вправо вдоль поперечной оси (поперечная ось объекта) и ось OY – вверх, перпендикулярно осям OX и OZ (при этом три оси образуют правую систему координат). Вдоль этих осей устанавливаются 3 акселерометра и 3 гироскопа БИНС.

Связь их единичных векторов описывается матрицей перехода:

$$\begin{cases} X^0 = a_{11}X_g^0 + a_{12}Y_g^0 + a_{13}Z_g^0, \\ Y^0 = a_{21}X_g^0 + a_{22}Y_g^0 + a_{23}Z_g^0, \\ Z^0 = a_{31}X_g^0 + a_{32}Y_g^0 + a_{33}Z_g^0; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_g^0 = a_{11}X^0 + a_{21}Y^0 + a_{31}Z^0, \\ Y_g^0 = a_{12}X^0 + a_{22}Y^0 + a_{32}Z^0, \\ Z_g^0 = a_{13}X^0 + a_{23}Y^0 + a_{33}Z^0; \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{pmatrix} \cos\theta \cdot \cos\psi & \sin\theta & -\cos\theta \cdot \sin\psi \\ -\cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot \sin\theta + \sin\gamma \cdot \sin\psi & \cos\gamma \cdot \cos\theta & \cos\gamma \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta + \sin\gamma \cdot \cos\psi \\ \sin\gamma \cdot \cos\psi \cdot \sin\theta + \cos\gamma \cdot \sin\psi & -\sin\gamma \cdot \cos\theta & -\sin\gamma \cdot \sin\psi \cdot \sin\theta + \cos\gamma \cdot \cos\psi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где угол курса ψ отсчитывается в горизонтальной плоскости OX_gZ_g от оси OX_g против хода часовой стрелки до проекции продольной оси объекта на эту плоскость; угол тангажа θ – в вертикальной плоскости между осью OX и ее проекцией на горизонтальную плоскость; угол крена γ – в поперечной плоскости между осью OZ и линией пересечения указанной плоскости с плоскостью горизонта. Если правый борт объекта находится ниже горизонтальной плоскости, то крен считается положительным.

В режиме начальной выставки все необходимые начальные координаты, углы и скорости задаются по сигналам самолетной БИНС перед сбрасыванием парашюта. Однако в момент раскрытия парашюта БИНС спускаемого объекта получит сильные инерционные возмущения, что может потребовать переустановки «нулей» с использованием режима комплексирования с другими навигационными и измерительными системами. Заметим, что на малых интервалах времени (малых участках спуска) может оказаться неудовлетворительным либо быстродействие, либо точность таких систем по сравнению с БИНС. Однако на длинных участках спуска, наоборот, ошибки БИНС будут накапливаться, а для комплексирующих систем этого обычно не происходит. В условиях повышенных радиопомех периодическое комплексирование можно проводить также по видеоизображению земной поверхности с парашюта.

В рабочем режиме БИНС решаются две взаимосвязанные задачи: угловой ориентации и позиционной навигации. Основными измерительными средствами в задаче нахождения угловой ориентации являются три гироскопических датчика угловой скорости (ДУС) или три твердотельных волновых гироскопа [1]. Данными гироскопами измеряются соответствующие проекции угловой скорости ω_x, ω_y, ω_z поворота объекта с учетом влияния собственного вращения Земли U. Эти сигналы содержат вклад переносного собственного вращения Земли и вклад относительного вращения по углам (ψ, θ, γ). В результате для нахождения временного изменения углов ориентации $\psi(t), \theta(t), \gamma(t)$ требуется решить следующую систему дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} \dot{\vartheta} = \omega_Y^r \sin\gamma + \omega_Z^r \cos\gamma, \\ \dot{\psi} = \dfrac{1}{\cos\nu}\left(\omega_X^r \cos\gamma - \omega_Z^r \sin\gamma\right), \\ \dot{\gamma} = \omega_X^r - tg\nu\left(\omega_Y^r \cos\gamma - \omega_Z^r \sin\gamma\right), \end{cases} \tag{4}$$

$$\omega^r = \omega - U, \tag{5}$$

$$\begin{cases} U_X = U_\Gamma a_{11} + U_B a_{12}, \\ U_Y = U_\Gamma a_{21} + U_B a_{22}, \\ U_Z = U_\Gamma a_{31} + U_B a_{32}, \end{cases} \tag{6}$$

$$U_\Gamma = U \cdot \cos\phi,\ U_B = \\ = U \cdot \sin\phi,\ U \approx 15{,}041 \text{ град/час}, \tag{7}$$

где для интересующих нас объектов парашютного спуска угол широты ϕ естественно считать заданным и не изменяемым в процессе спуска.

Результаты и их обсуждение

В результате модель задачи угловой ориентации БИНС получается автономной и решается независимо от задачи позиционной навигации. С другой стороны, она формирует необходимую информацию об углах ориентации акселерометров в пространстве при решении задачи спуска груза в заданную область.

Задача позиционной навигации решается на основе показаний трех акселерометров, установленных вдоль осей приборной системы координат. Измеряемые акселерометрами ускорения ***n*** складываются из вектора ускорения силы тяжести с компонентами $g = (0,-g,0)$ и из абсолютного ускорения ***a*** точки O [3]:

$$n = g + a, \;\; a = a^e + a^c + a^r. \qquad (8)$$

Переносное ускорение $a^e = U \times U \times R$ имеет порядок $U^2 R \sim 3.3 \cdot 10^{-2}$ м/сек^2 ($U = 2\pi / 24\,\text{ч} \cdot 60\,\text{мин} \cdot 7.3 \cdot 10^{-5}$, $R \approx 6.36 \cdot 10^6\,\text{км} \cdot 10^3\,\text{м}$), что крайне мало по сравнению с $g \approx 9.8\,\text{м/сек}^2$. Поэтому его можно не учитывать, полагая $a^e \approx 0$.

Кориолисово ускорение $a^c = 2U \times V^r$ имеет порядок $a^c \sim 2UV$, что для скоростей 20 м/сек оценивается в 3…10^{-3} м/сек^2. То есть им тоже можно пренебречь по сравнению с влиянием g, полагая $a^c \approx 0$.

Относительное ускорение a^r представляет собой сумму производной по времени от относительной скорости и влияния поворота по углам широты и долготы. В нашей задаче углы широты и долготы практически не меняются, поэтому последним слагаемым тоже пренебрегаем. В итоге можно считать, что акселерометрами измеряется вектор:

$$n = g + \partial V^r / \partial t \Rightarrow V^r = \int (n - g)\partial t, \qquad (9)$$

где измеряемый акселерометрами вектор ***n*** предварительно с помощью выписанной выше матрицы направляющих косинусов A пересчитывается в географическую систему координат, в которой $g = (0,-g,0)$.

Второе интегрирование по времени даст приращения по месту позиционирования, т. е. траекторию парашютного спуска относительно заданных начальных условий (определяемых начальной выставкой или скорректированных в режиме комплексирования с другими измерительными системами).

Выводы

В заключение отметим, что одновременно с рассмотренной динамической задачей БИНС может решаться более грубая квазистатическая задача БИНС, предполагающая сильное усреднение сигналов гироскопов и акселерометров, после чего решение производится в статике.

Список литературы

1. *Шишаков, К. В.* Построение модели волновой динамики резонатора твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве : науч.-практ. журн. – 2009. – № 2. – С. 66–75.

2. *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.

3. *Селиванова, Л. М.* Инерциальные навигационные системы : учеб. пособие Ч. 1 : Одноканальные инерциальные навигационные системы./ Л. М. Селиванова, Е. В. Шевцова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 46 с. : ил.

M. V. Simonov, postgraduate student
K. V. Shishakov, CSc in phys. and math., associate professor
E-mail: simonov_marat@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Simulation of Strapdown Inertial Navigation Systems on Vertical Trajectories for Parachute Descent

The article touches on the theme of navigation of parachute descent on vertical trajectories. The author proposes a model of the strapdown inertial navigation system, which allows solving the problems of angular orientation and positional navigation for these conditions.

Keywords: strapdown inertial navigation system, navigation, modeling, parachute descent.

УДК 004.056.5

Н. Л. Трофимова, студент
E-mail: nataliya.otorva@yandex.ru
В. Н. Моряков, студент
E-mail: cool.vic21@yandex.ru
М. М. Емельянова, ст. преподаватель
E-mail: em-mari@mail.ru
В. Н. Емельянов, канд. техн. наук, доц.
E-mail: em.vl@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Влияние помех на работу технологии NFC при бесконтактной оплате

В статье приводятся результаты эксперимента по измерению максимального расстояния работы технологии беспроводной оплаты NFC с использованием банковской карты и смартфона. В качестве препятствий для радиосигнала используются различные материалы: фольга, шерсть, ткань, искусственная кожа. Производится анализ полученных результатов эксперимента.

Ключевые слова: NFC, помехи, бесконтактная оплата, смартфон, банковская карта.

Бесконтактные способы оплаты, их преимущества и недостатки

Во всем мире большую популярность набирает бесконтактный способ оплаты, т. е. когда нет физического контакта банковской карты со считывающим терминалом. Бесконтактная оплата – это удобный и современный метод, который позволяет клиентам оплачивать различные товары и услуги, тратя на это значительно меньше времени, чем при оплате банковской картой с чипом или магнитной полосой.

Осуществить оплату бесконтактным способом возможно только с помощью банковских карт, оснащённых функцией PayPass и PayWave. Такие карты могут использоваться в терминалах POS (Point Of Sale – точка продажи) и банкоматах точно так же, как и обычные карты с магнитной лентой или чипом. Первоначально банковские карты с функцией PayPass и PayWave получили распространение в 2005 г. в США. В настоящее время такие карты стали часто использоваться во многих странах мира, в том числе и в России [1].

© Трофимова Н. Л., Моряков В. Н., Емельянова М. М., Емельянов В. Н., 2018

Основным компонентом банковской карты для бесконтактной оплаты является чип RFID, созданный по стандарту ISO 14443. Данный стандарт предназначен для работы с картами с малой дальностью чтения, но при этом с достаточно высокой скоростью передачи данных. Считывание и запись информации с карты производится с помощью радиосигналов на частоте 13,56 МГц. При этом данные на карте могут быть защищены шифрованием [1, 2].

Следующей ступенью развития бесконтактной оплаты является технология NFC. NFC (Near Field Communication) – технология беспроводной высокочастотной связи малого радиуса действия, которая дает возможность обмена данными между устройствами, находящимися на расстоянии до 10 см друг от друга [2]. Чип NFC встраивают почти во все современные смартфоны. Посредством приложений Android Pay, Apple Pay, Samsumg Pay, пользователь может использовать свой смартфон для оплаты, предварительно добавив виртуальные дубликаты реальных банковских карт в профиль устройства.

Основными преимуществами бесконтактной оплаты являются:

1. *Простота и удобство использования.* Необходимо просто поднести банковскую карту к терминалу оплаты или банокомату. В отличие от традиционных банковских карт, часто отсутствует необходимость подтверждения покупки путем ввода ПИН-кода или подписи на чеке. В разных странах устанавливаются пороговые суммы покупки, которые не потребуют ввода ПИН-кода. В Росии это 1000 рублей, в Америке – 15 долларов, в странах Евросоюза – 10 евро [3].

2. *Быстрое проведение операции.* Как указно выше, ввод ПИН-кода не требуетя, а запрос и ответ передаются мгновенно, поэтому время оплаты сокращается до 2–3 секунд.

3. *Уменьшение риска технических ошибок*. Бесконтактная карта физически не контактирует с терминалом, поэтому уменьшается вероятность внешнего воздействия, что увеличивает срок ее службы.

4. *Безопасность*. Поскольку при оплате клиент не выпускает карту из рук, уменьшается риск подделки или кражи реквизитов с помощью фото- и видеофиксации, которой могут воспользоваться мошенники.

Недостатками бесконтакной оплаты считаются:

1. *Недостаточная информированность населения*. Многие люди не знают о таком способе оплаты, поэтому его повсеместное применение в данный момент невозможно.

2. *Недостаточное развитие инфраструктуры*. Недостаточное оснащение терминалами с функцией приема бесконтактного метода оплаты.

3. *Особые требования к защите*. Злоумышленник, имеющий мобильный терминал, может считать данные с карты или смартфона незаметно от пользователя, поднеся к нему терминал.

Выявление влияния помех на дальность бесконтактной оплаты

Учитывая высокую опасность последнего из вышеуказанных недостатков, было решено выявить влияние препятствий на дальность действия бесконтактных устройств в реальных условиях и способы защиты от несанкционированного проведения оплаты. Для этого был проведен эксперимент, задача которого – обозначить пределы взаимодействия устройства оплаты и терминала в различных условиях, приближенных к реальным ситуациям. Используемое в эксперименте оборудование:

- банковская карта Visa, оснащенная функицией PayWave,
- терминал с функцией POS – Verifone VX 820 (рис.1),
- смартфон LG Nexus 5 со встроенным чипом NFC,
- измерительная линейка,
- материалы для создания помех (фольга, искуственная кожа, шерсть, плотная ткань демисезонной куртки).



Рис. 1. POS-терминал

В качестве пользовательского смартфона с чипом NFC был использован LG Nexus 5, с моделью чипа – Broadcom BCM20793M (рис. 2).

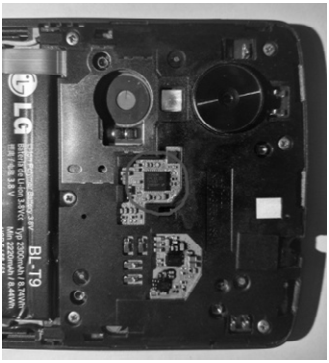


Рис. 2. NFC чип в смартфоне LG Nexus 5

Взаимодействие терминала со смартфоном происходит посредством авторизации в приложении Android Pay бакновской карты Visa. На задней панели смартфона расположена антенна, передающая сигнал, защищенная пластмассовой пластиной (рис. 3).

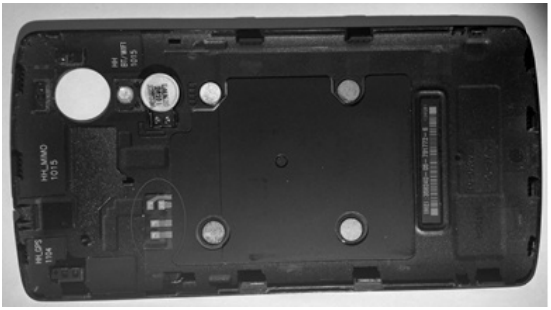


Рис. 3. Антенна NFC

В ходе эксперимента были проведены измерения максимального расстояния, на котором проходит платеж с бесконтактной карты Visa и смартфона LG Nexus 5. В качестве помех, препятствующих контакту устройств, были использованы материалы, внешний вид которых представлен на рис. 4.



Рис. 4. Материалы, используемые в качестве помех

Для точности эксперимента измерение дальности связи с использованием каждой помехи было проведено 10 раз. Результаты с учетом усредненных показателей измерений передставлены в таблице.

Расстояние бесконтактной оплаты при присутствии препятствий

Тип препятствия	Карта оплаты	Смартфон
Без препятствий	5,4±0,5 см	3,3±0,3 см
Кошелек (иск. кожа)	2,1±0,2 см	1,4±0,2 см
Куртка (через карман)	1,5±0,1 см	1,1±0,1 см
Варежка (шерсть)	1,0±0,1 см	0,5±0,1 см
Фольга	0	0

Результаты проведенного исследования показывают, что дальность действия сигнала напрямую зависит от плотности материала, используемого в качестве помехи на пути его распространения. Шерстяная варежка является более серьезным препятствием, чем кошелек из искуственной кожи. Максимальная дальность связи без каких-либо препятствий получилась равна 5,4 см. В то же время металлизированная фольга полностью блокировала сигнал, создаваемый передающим устройством. Во всех случаях смартфон реагирует на терминал на меньшем расстоянии, чем карта, в среднем на 20 %. Причиной этому может быть низкая чувствительность антенны модуля NFC.

Таким образом, для списания денежных средств с карты или телефона без ведома клиента злоумышленнику необходимо поднести терминал оплаты к ним почти вплотную. А надежно защитить карту сможет только чехол из экранированного материала.

Заключение

Развитие систем бесконтактного способа оплаты позволяет клиентам быстро и удобно оплачивать покупки и услуги. По результатам

проведенного эксперимента, различные материалы ухудшают взаимодействие терминала и банковской карты, уменьшая дальность связи до 5,4 см. Также можно сделать вывод, что клиент для собственного удобства при совершении оплаты может не доставать банковскую карту из кошелька или кармана куртки и не снимать чехол смартфона. А стопроцентно защитить банковскую карту от незаконной оплаты сможет только чехол из экранированного материала.

Список литературы

1. *Кожевников, Н. С.* Преимущества и недостатки использования бесконтактных банковских карт [Электронный ресурс] // Гуманитарные научные исследования. – 2014. – № 6. – URL: http://human.snauka.ru/2014/06/6747 (дата обращения: 18.12.2017).

2. *Емельянов, В. Н.* Проблемы безопасности использования платежных банковских карт / В. Н. Емельянов, М. М. Павлова, И. А. Кайсина // Наука и современность : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Уфа : Аэтерна, 2015. – С. 16–19.

3. Бесконтактные платежи Visa и MasterCard [Электронный ресурс] // BitCompass – Путеводитель в мире биткоин [Сайт]. – URL: http://bitcompass.ru/beskontaktnye-platezhi-visa-i-mastercard-post-86 (дата обращения: 18.12.2017).

N. L. Trofimova, student
E-mail: nataliya.otorva@yandex.ru
V. N. Moryakov, student
E-mail: cool.vic21@yandex.ru
M. M. Emelianova, senior lecturer
Email: em-mari@mail.ru
V. N. Emelianov, CSc in engineering, associate professor
E-mail: em.vl@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Impact of Interference on Contactless NFC Payments

The article presents the results of an experiment to measure the maximum distance for the NFC wireless payment technology using a bank card and smartphone. Various materials are used as barriers to the radio signal: foil, wool, cloth. The results of the experiment are analyzed.

Keywords: NFC, interference, contactless payment, smartphone, bank card.

Секция 5. **Физические методы в приборостроении**

УДК 502.656

В. А. Алексеев, д-р техн. наук, проф.
E-mail: alekseevv@istu.ru
В. П. Усольцев, канд. техн. наук, ведущий инженер-электроник
Д. Н. Шульмин, соискатель
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Регистрация сброса загрязняющих веществ в сточные воды промышленного предприятия

Рассмотрена автоматизация регистрации аварийного сгустка в сточных водах на примере модельных жидкостей. Представлена методика тестирования неоднородных оптических сред с процедурами проверки различных аспектов отдельно выделенных характеристик оптических сред, которая позволяет выявить отличия между реально существующими и требуемыми свойствами сред, прогнозировать динамику их изменения.

Ключевые слова: аварийные сбросы, водные загрязнения, система очистки сточных вод, устранение аварийных сбросов.

Введение

Водные ресурсы интенсивно загрязняются продуктами человеческой деятельности, к которым в первую очередь следует отнести техногенные (промышленные) загрязнения. Особую опасность для экологии представляют аварийные сбросы в сточные воды, которые вызывают сильные загрязнения. При проектировании систем, обеспечивающих очистку воды, существует риск залпового сброса вредных веществ. Анализ систем контроля качества воды показал, что не обнаруженный сброс загрязняющих веществ может привести к неблагоприятным последствиям и повреждению системы фильтрации. Акту-

© Алексеев В. А., Усольцев В. П., Шульмин Д. Н., 2018

альной экологической задачей остается организация отвода, сброса и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий [1]. Существующие системы очистки сточных вод не обеспечивают полного извлечения загрязняющих веществ [2]. Предупредить попадание аварийных сбросов от промышленных предприятий в источники водоснабжения возможно при фиксации этих сбросов в сточных водах промышленного предприятия или в системах водоподготовки (на входе в эту систему) и обеспечив направление аварийных сбросов в отстойник. Для фиксации сброса сточных вод предложена автоматизированная система измерений и обработки оптической плотности водных сред, на которой были проведены экспериментальные исследования оптической плотности различных водных сред.

С целью разработки методики нахождения оптических параметров жидкости для выбранной длины волны лазерного зондирования жидкой среды были проведены следующие экспериментальные исследования:

– исследование диапазона линейности отклика датчика (фотоприемника) с помощью стекол с известными значениями пропускания (оптической плотности) и исследования погрешности измерений на стенде;

– исследование чувствительности датчика на изменение турбулентности потока жидкости при различных потоках лазерного излучения;

– исследование статистической обработки экспериментальных данных с использованием сглаживания на основе функции Гаусса;

– исследование влияния однократного и многократных «сбросов» взвеси загрязненного раствора при различных потоках лазерного излучения и различных концентрациях раствора;

– исследование результатов измерений аварийного сброса от двух датчиков (опорного и измерительного) для различных потоков излучения;

– исследования работоспособности оптического датчика на других модельных жидкостях (дистиллированная и проточная вода);

– исследования методики тестирования с использованием разработанного программного обеспечения для ряда загрязняющих веществ (смеси с содержанием 30, 40, 60 и 70 % подсолнечного масла и нефти).

Основной целью исследований являлось подтверждение работоспособности выбранного метода измерений оптической плотности с

обеспечением отношения сигнал/шум не менее 100, а также проверка метода на выбранной длине волны 635 нм для ряда жидкостей класса суспензий и эмульсий.

В статье приведена методика тестирования лабораторной установки по измерению оптической плотности водных сред с различными загрязнителями.

На основании обработки и анализа кривых изменения оптической плотности водных сред установлено [3–6], что лабораторная установка контроля изменений оптической плотности водных сред наглядно в режиме реального времени регистрирует изменение оптических свойств смеси веществ, протекающей по гидросистеме установки. Проведенные экспериментальные исследования на выбранных примесях (подсолнечное масло, нефть) показали возможность автоматического контроля изменений оптической плотности жидкости в большом динамическом диапазоне.

Показано, что установка эффективна при содержании подсолнечного масла в смеси более 50 %. Для повышения точности и снижения порога чувствительности рекомендуется применить пару источник излучения – фотоприемник излучения с длинами волн с учетом спектров поглощения жидкостей, используемых в экспериментах. Спектры поглощения воды [7], подсолнечного масла и его смеси, полученные в результате проведенных в рамках данной темы экспериментов, приведены на рис. 1–3.

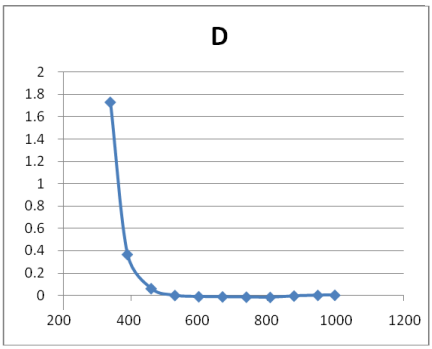


Рис. 1. Изменение оптической плотности подсолнечного масла от длины волны излучения

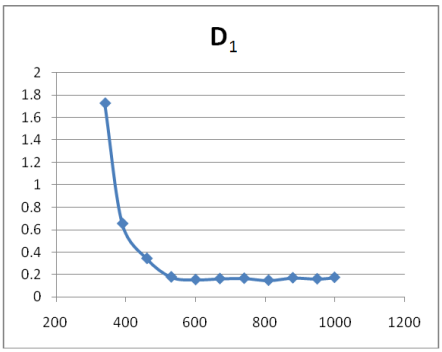


Рис. 2. Изменение оптической плотности воды с примесью подсолнечного масла в пропорции 1:1 от длины волны излучения

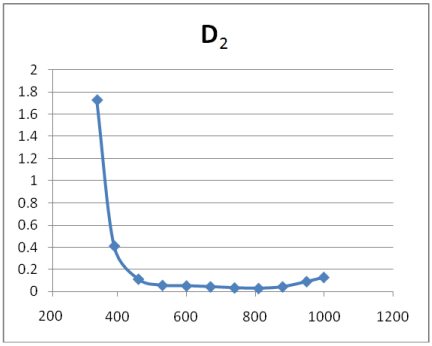


Рис. 3. Изменение оптической плотности воды с примесью подсолнечного масла в пропорции 1:2 от длины волны излучения

Значения оптической плотности подсолнечного масла для различных длин волн получены на однолучевом спектрофотометре КФК-3КМ в спектральном диапазоне длин волн 340…1000 нм. Приведены значения оптической плотности воды с примесью подсолнечного масла в пропорции 1:1. Рисунки 2 и 3 отображают значения оптической плотности в диапазоне длин волн, полученные при движении от минимального значения длины волны к максимальному и от максимального значения к минимальному соответственно.

В соответствии с рис. 3, наименьшее поглощение излучения водной средой наблюдается в интервале 400…600 нм. На основании анализа полученных значений оптической плотности водных сред рекомендуется применить пару источник излучения – фотоприемник излучения с длинами волн в диапазоне 450…550 нм, которым соответствует минимальное поглощение в водной среде и максимальное поглощение в среде примеси. В качестве фотоприемника был использован фотодиод типа PDV-V400-46, а в качестве источника излучения – BL-FL7660PGC с длиной волны 525 нм.

В результате обработки кривых изменения оптической плотности водных сред установлена полная пригодность и устойчивая работоспособность разработанной лабораторной установки контроля изменений оптической плотности водных сред для решения поставленных задач, связанных с выбором режимов и отработки технологии контроля аварийных сбросов в сточных водах промышленных предприятий.

Разработанная аппаратная часть и программное обеспечение универсальны, согласованы по протоколам обмена данными и полностью адаптированы между собой.

Оптический тракт защищен от помех, что позволяет надежно обнаруживать наличие смеси и, соответственно, контролировать аварийные сбросы в сточных водах.

Предложенный уровень настроек и регулировок лабораторной установки полон и достаточен для учета и компенсации начальных условий, индивидуальных особенностей, погрешностей и помех водных сред и смесей.

Составлен гибридный алгоритм обнаружения аварийной ситуации и формирование команды на управление установкой.

При разработке методики как алгоритма проведения целенаправленных действий в процессе анализа, направленных на выявление отличий между реально существующими и требуемыми свойствами неоднородных оптических сред, были заложены следующие требования к методике как к конкретной процедуре:

– реалистичность;
– воспроизводимость;
– внятность;
– соответствие целям и задачам планируемого действия, обоснованность;
– результативность;
– четкая структурно-логическая схема.

В соответствии с IEEE Std 829-1983 разработанная методика тестирования основывается на тестовых процедурах с конкретными входными данными, начальными условиями и ожидаемыми результатами, разработанными для конкретной цели, такой как тестирование отдельной оптической среды или верификация соответствия оптической среды определенным требованиям. Тестовые процедуры проверяют различные аспекты отдельных характеристик оптических сред и адекватное выполнение требований к аппаратуре контроля.

При проведении тестовых процедур за «базовую» точку отсчета принята воздушная оптическая среда. Когда между источником сигнала и приемником находится воздушная среда, изменения сигнала незначительны и определяются флуктуационными токами аналоговых компонентов контрольной аппаратуры. В соответствии с показаниями выбраны режимы работы контрольной аппаратуры, которые приняты за основные.

Полученные данные по диапазону изменения оптической плотности сред «воздух – вода», «воздух – подсолнечное масло», «воздух – нефть» позволяют прогнозировать возможное изменение оптической плотности смеси жидких сред «вода – подсолнечное масло», «вода –

нефть» и выбрать оптимально обоснованные режимы работы контрольной аппаратуры.

По гидросистеме пропускается водопроводная вода с примесью подсолнечного масла. При прохождении подсолнечного масла через оптический тракт оптическая плотность изменяется незначительно, изменение уровней сигнала слабо выражено, что вытекает из ранее приведенного, из-за приблизительно равных оптических плотностях воды и масла, однако границы прохождения ярко выражены (рис. 6).

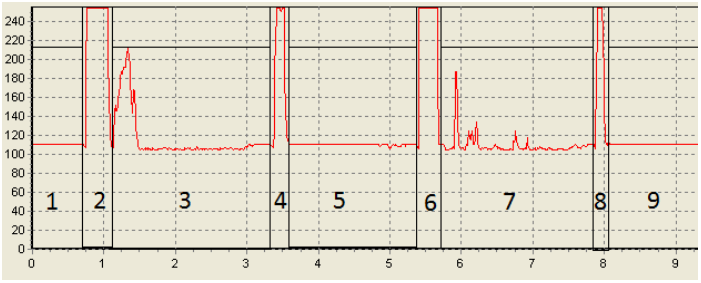


Рис. 6. Вода – масло

Областям под номерами 1, 5 и 9 соответствует прохождение слоя воды через оптический тракт и связанное с этим изменение коэффициентов пропускания и отражения среды. При прохождении границы сред «вода – масло» в областях 2, 4, 6, 8 значение сигнала на фотоприемнике скачкообразно повышается до максимального уровня. Областям 3 и 7 соответствует прохождение слоя масла через оптический тракт.

На следующем этапе исследований по гидросистеме пропускается водопроводная вода с примесью нефти. При прохождении нефти через оптический тракт оптическая плотность увеличивается, изменение уровней сигнала ярко выражено предположительно из-за большей вязкости нефти (рис. 7).

Области 1 и 5 соответствуют прохождению нефти. Области 2 и 4 соответствуют прохождению границы сред. Область 3 на рис. 7 соответствует прохождению водного слоя в оптическом тракте. Нулевое значение напряжения на фотоприемнике обусловлено измененным коэффициентом фотоусилителя.

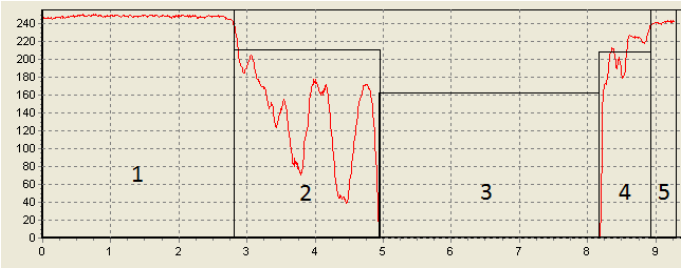


Рис. 7. Вода – нефть

Разработанная методика тестирования неоднородных оптических сред с тестовыми процедурами проверки различных аспектов отдельно выделенных характеристик оптических сред позволяет выявить отличия между реально существующими и требуемыми свойствами оптических сред, прогнозировать динамику их изменения и трансформации, выполнять сравнение и масштабирование при различных режимах работы контрольной аппаратуры.

Выводы

Из экспериментальных исследований видно, что разработанная установка контроля изменений оптической плотности водных сред позволяет уверенно контролировать смесь с содержанием подсолнечного масла свыше 50 %, позволяет обнаруживать наличие смеси и, соответственно, контролировать аварийные сбросы в сточных водах.

Обработка и анализ кривых изменения оптической плотности показали стабильность автоматической регистрации аварийного сгустка на ряде модельных жидкостей с достоверностью обнаружения сгустка более 80 %.

Проведенные экспериментальные исследования методики тестирования неоднородных оптических сред для ряда загрязняющих веществ (подсолнечное масло, нефть) и полученные результаты позволили прогнозировать возможные изменения оптической плотности смеси жидких сред «вода – подсолнечное масло», «вода – нефть», «воздух – нефть», «воздух – вода», «воздух – подсолнечное масло» и выбрать оптимально обоснованные режимы работы контрольной аппаратуры.

Список литературы

1. *Шахмарьян, М. А*. Уральский регион России – опасности природного, техногенного и экологического характера / М. А. Шахмарьян, В. А. Акимов, К. А. Козлов // Экология и промышленность России. – 2002. – № 3. – С. 4–8.

2. *Комаров, В. И*. Проблемы экологии в пищевой промышленности / В. И. Комаров, Т. А. Мануйлова // Экология и промышленность России. – 2002. – № 6. – С. 4–5.

3. *Финкелстайн, Л.* Наука об измерениях и средствах измерений : Аналитический обзор // Приборы и системы управления. – 1995. – № 8. – С. 44–51.

4. *Пешель, М*. Моделирование сигналов и систем. – М. : Мир, 1981. – 320 с.

5. *Мирский, Г. Я*. Электронные измерения. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

6. *Карабегов, М. А*. Развитие научно-технических основ построения и метрологического обеспечения оптических анализаторов жидких сред : автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.11.13. – М., 2006. – 58 с.

7. *Золотарев, В. М.* Оптические постоянные природных и технических сред : справочник / В. М. Золотарев, В. Н. Морозов, Е. В. Смирнова. – Л. : Химия, 1984. – 215 с.

V. A. Alekseev, DSc in engineering, professor
E-mail: alekseevv@istu.ru
V. P. Usoltsev, CSc in engineering, head of laboratory
D. N. Shulmin, applicant
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Registration of Discharges of Pollutants into Industrial Wastewater

The automation of registration of an emergency bunch in wastewater is considered using the example of model liquids. A technique for testing non-homogeneous optical media with verification procedures for various aspects is presented, which can reveal the differences between the real and the required properties, and predict the dynamics of their changes.

Keywords: emergency discharges, water pollution, sewage treatment system, elimination of emergency discharges

УДК 53.087.47

Д. Н. Буранов, студент
E-mail: denis_buranov_04@mail.ru
В. П. Усольцев, канд. техн. наук, ведущий инженер-электроник
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Нанесение графических элементов на биоматериал с помощью лазера

В данной работе изложены особенности дистанционной идентификации различных биоматериалов. Произведен анализ сканирующих устройств по типу считывающего устройства. Разработана лазерная технология нанесения изображения с учетом индивидуальных характеристик материала. Испытана методика нанесения изображения и проведены статистические испытания по полученным результатам.

Ключевые слова: идентификация биоматериала, сканирующие устройства, полутоновый клин.

Введение

Целью работы является разработка и испытание системы лазерной идентификации сельскохозяйственных животных на основе использования эффективного метода нанесения и считывания кодированной информации.

На сегодняшний день для идентификации на животных наносятся специальные коды, которые исполняют роль паспорта животного, где могут содержаться данные не только о самом животном, но и его владельце. Помимо этого, паспорт содержит данные о прививках, вакцинациях и другие важные сведения, в том числе о перемещении животного. Наносимые коды должны обеспечивать фиксацию, длительную сохранность и различимость отличительных знаков на значительных расстояниях [1].

Основным требованием к мечению животных, безусловно, является уникальность. Любая метка – часть информационной системы, и суть содержащихся в ней данных – быть максимально достоверными. Это совершенно необходимо, потому что на поиск и отсеивание неверной информации в больших массивах данных придется затрачивать нема-

© Буранов Д. Н., Усольцев В. П., 2018

ло времени и средств. К этим потерям необходимо также добавить и прямые убытки, к которым может привести неадекватное решение, принятое на основе неверной информации [2].

Наиболее перспективным в данном направлении является применение лазерного маркирования. Лазерное излучение универсально, его можно применять для нанесения изображения на любой органический биоматериал, что позволяет значительно усовершенствовать процедуру идентификации [3].

Нанесение графических элементов на биоматериал с помощью лазера

Для оценочного исследования характеристик нанесенных меток с помощью лазера было решено использовать полутоновый клин для факсимильной аппаратуры.

Внешний вид оптического клина представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид полутонового клина

Полутоновый клин должен иметь 15 ступеней оптической плотности. Все ступени одинаковы по размеру. Зазоры между полями ступеней не допускаются.

Оптическая плотность ступеней возрастает от 1-й ступени к 15-й, а ее значения изменяются от 0,05 до 1,74. Результат нанесения полутонового клина на кожу представлен на рис. 2.



Рис. 2. Результат нанесения полутонового клина на кожу

В результате работы алгоритма за 15 переходов была воспроизведена вся линейка изменения оптической плотности. Также при выполнении алгоритма на лазерном гравере будет меняться рельеф обрабатываемой поверхности, что будет видно из исследования ниже.

Для исследования микронеровностей на обрабатываемых материалах был использован микроинтерферометр МИИ-4. По полученным результатам можно сделать следующие выводы: для всех исследуемых образцов математическое ожидание микронеровностей достигает своего максимального значения к седьмой ступени. От первой к седьмой ступени наблюдается возрастающий тренд, далее он меняется на противоположный (см. рис. 3). Дисперсия для материалов меняется непредсказуемо, следовательно, разброс результатов не зависит от увеличения мощности. Значения корреляции говорят об отсутствии взаимосвязи между значениями соседних ячеек.

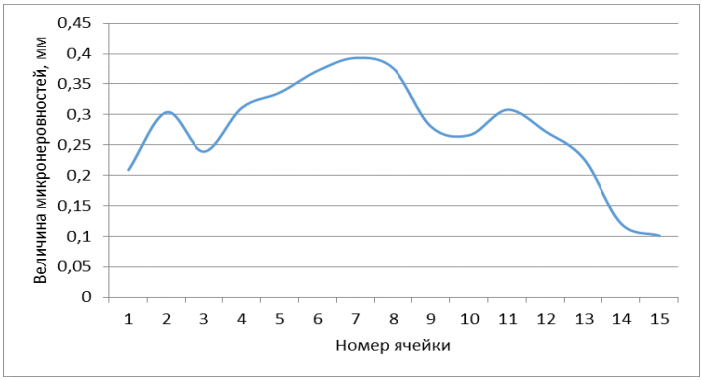


Рис. 3. Математическое ожидание величины микронеровностей

Для оценки контрастности обработанных образцов мы провели исследование на фотоэлектрическом блескомере ФБ-2.

В ходе исследования обработанных материалов каждая ступень полутонового клина сравнивалась с необработанной поверхностью.

Из результатов исследования видим, что заданная техническими характеристиками считывающих устройств контрастность в 20 % достигается к шестой ступени, однако показатели контрастности находятся вблизи граничных значений для считывания, поэтому в качестве минимального значения мощности для нанесения изображения мы

выбираем ступень номер семь, которая является универсальной для всех исследуемых образцов.

Выводы

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

– Проведен литературный обзор и анализ способов и методов кодирования информации в сфере сельскохозяйственного животноводства.

– Проведен анализ сканирующих устройство по типу считывающего устройства.

– Разработана лазерная технология нанесения изображения с учетом индивидуальных характеристик материала.

– Испытана методика нанесения изображения и проведены статистические испытания по полученным результатам.

Список литературы

1. *Гримблатов, В. М.* Современная аппаратура и проблемы низкоинтенсивной лазерной терапии // Применение лазеров в биологии и медицине : Сборник. – Киев : Техника, 1996. – С. 123–127.

2. Современные методы мечения животных: описание, принципы, перспективы и практические отчеты [Электронный ресурс] // Vetlek: Ветеринарная интернет-аптека. – URL: http://www.vetlek.ru/articles/?id=280 (дата обращения: 07.11.2017).

3. *Усольцева, А. В*. Исследование лазерного гравирования изделий из кости / А. В. Усольцева, М. М. Черных, В. П. Усольцев // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке : сб. материалов II Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с междунар. участием (Ижевск, 22–23 апр. 2015 г.). – Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. – С. 713–721.

D. N. Buranov, student
E-mail: denis_buranov_04@mail.ru
V. P. Usoltsev, CSc in engineering, leading electronics engineer
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Application of Graphic Elements on a Biomaterial Using a Laser

This paper presents the features of remote identification of different biomaterials. The analysis of scanning devices the type of reading, the device. Developed the laser technology of printing images based on the individual characteristics of the material. Tested method of drawing the image and performed a statistical test on the obtained results.

Keywords: identification of biological material, scanning device, gray-scale wedge.

УДК 62-1/-9

Р. Г. Дойников, студент
E-mail: ruslan9_97@mail.ru
А. И. Калугин, канд. физ.-мат. наук, доц.
Е. А. Антонов, канд. физ.-мат. наук, доц.
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Система регистрации оптического сигнала лазерного термометра

В статье представлена электронная система регистрации оптического сигнала лазерного термометра. Приведена структурная и принципиальная схемы системы регистрации сигнала. Определены компоненты системы.

Ключевые слова: лазерная установка, термометрия, система регистрации.

Введение

Работа установки для лазерной термометрии поверхности металла основана на методе термометрии по отраженному от нагреваемой поверхности свету. Этот метод удобен для определения быстрых малых температурных изменений, поскольку при его использовании необходимо регистрировать не точные значения коэффициента отражения, что является достаточно сложной задачей, а его изменения. Метод лазерного термоотражения обеспечивает микронное пространственное и наносекундное временное разрешения. Время, в течение которого образец прогревается на глубину, превышающую глубину формирования отраженной волны, определяет инерционность измерений [1].

Усиление выходного сигнала с фотоприемного устройства

В ходе разработки установки для лазерной термометрии поверхности металла возникла проблема, связанная с обработкой входного сигнала, полученного от фотоприемника.

В качестве излучателя в установке был выбран светодиод TLWBG76, который имеет рабочую длину волны излучения 505 нм. Выбор длины волны излучателя обусловлен зависимостью коэффициента отражения R от длины волны и температуры. При уменьшении длины волны зависимость R от температуры усиливается, т. е. при

© Дойников Р. Г., Калугин А. И., Антонов Е. А., 2018

меньших изменениях T коэффициент отражения изменяется на большую величину при малых длинах волн. Однако чем меньше длина волны, тем больше коэффициент поглощения вещества. Поэтому наиболее оптимальным значением для длины волны будет зеленая область видимого спектра.

В зависимости от исследуемого материала, состояния его поверхности отраженный сигнал может колебаться в широком диапазоне значений. При этом выходной сигнал с фотоприемника может быть очень слабым. Следовательно, для получения корректных и точных данных необходимо усиление выходного сигнала.

Для измерения и усиления полезного сигнала была разработана система регистрации оптического сигнала, структурная схема которого представлена на рис. 1.

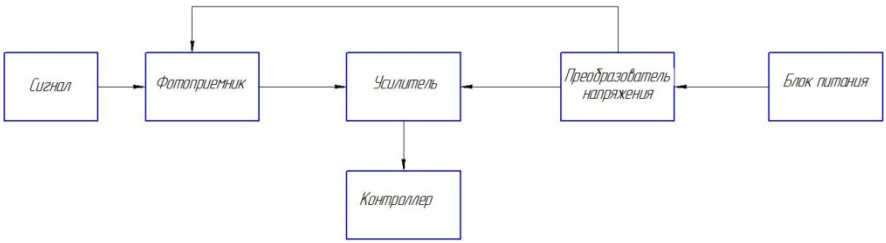


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации оптического сигнала

Работа разрабатываемой лазерной установки для термометрии поверхности металла основывается на методе измерения коэффициента отражения от поверхности [1]. Для улавливания и преобразования отраженного от металла лазерного излучения в электрический сигнал выбран фотодиод с предусилителем OPT101 [2] (на рис. 2 представлена его спектральная чувствительность в зависимости от длины волны). Из графика видно, что фотоприемное устройство OPT101 подходит для решения поставленной задачи.

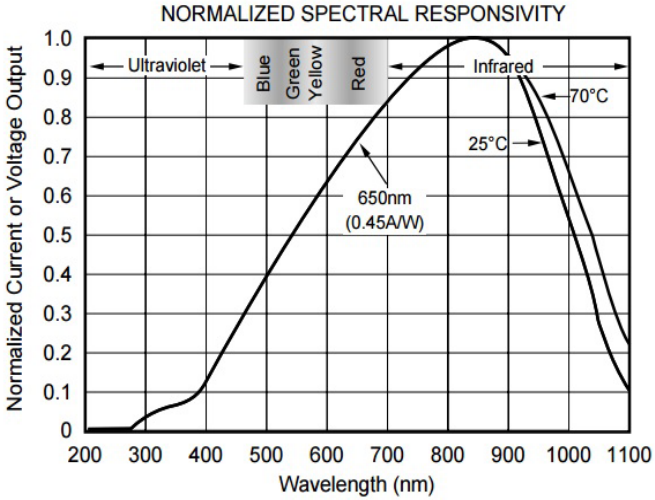


Рис. 2. График спектральной чувствительности фотоприемника OPT101

Общая принципиальная схема системы регистрации сигнала фотоприемника представлена на рис. 3.

Принципиальная схема разделена на блоки:

1) фотоприемное устройство;
2) блок питания;
3) преобразователь напряжения;
4) усилитель.

В качестве источника питания выбран импульсный однополярный блок питания RS-15-48 (выходное напряжение 48 В, выходная мощность 15 Вт). В то же время для питания усилителя и фотодиода необходимы стабилизированные двухполярные источники постоянного тока и напряжения. Кроме того, пульсации выбранного блока питания могут служить дополнительным источником шумов и погрешностей. Поэтому для получения стабилизированного питания усилителя и фотоприемника был разработан преобразователь напряжения на ±15 В.

Блок усиления 4 основывается на базе операционного усилителя (ОУ) AD795 [3]. Данный ОУ обеспечивает низкий шум напряжения, малый дрейф напряжения смещения, очень малый входной ток смещения и малый потребляемый ток – 1,5 мА. Также AD795 обладает малым входным шумом – размах 3,3 мкВ в полосе от 0,1 до 10 Гц. Перечисленные характеристики ОУ позволят усилить сигнал до необходимого уровня, не исказив его.

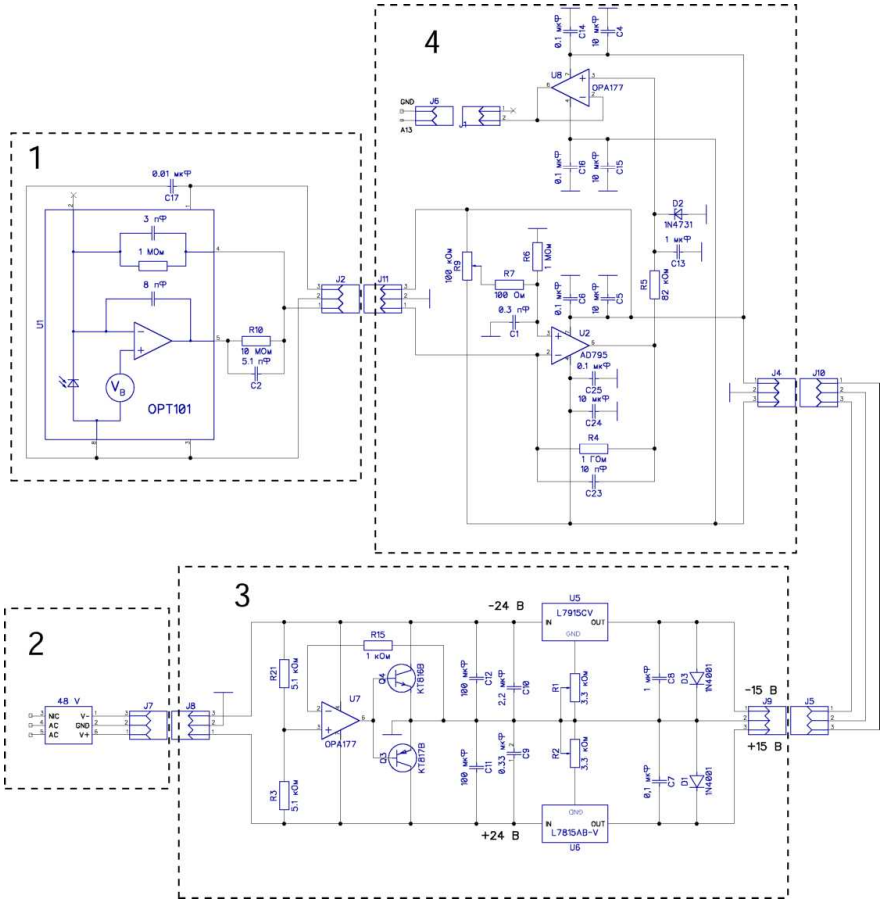


*Рис. 3. П*ринципиальная схема системы регистрации оптического сигнала

Контроллер планируется реализовать на основе платы Arduino Mega 2560 на базе микроконтроллера ATmega 2560.

Выводы

В работе была разработана структурная и принципиальная схемы системы регистрации оптического сигнала, подобраны основные составные элементы принципиальной схемы.

Разработанная система регистрации отраженного от поверхности нагреваемого металла оптического сигнала позволит с высокой точно-

стью измерять малые изменения температуры поверхности в режиме реального времени.

Список литературы

1. *Магунов, А. Н.* Лазерная термометрия твердых тел. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

2. OPT101 Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier [Электронные ресурс] // Texas Instruments. – 2015. – 31 с. – URL: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt101.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

3. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков [Электронный ресурс] / пер. Б. Л Горшков. – 1999. – 311 с. – ISBN-0-916550-20-6. – URL: http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/02/09/analog_devices._metody_prakticheskogo_konstruirovaniya_pri_normirovanii_signalov_s_datchika.pdf (дата обращения: 20.11.2017).

R. G. Doynikov, student
E-mail: ruslan9_97@mail.ru
A. I. Kalugin, CSc in Physics and Mathematics, assoc. prof.
E. A. Antonov, CSc in Physics and Mathematics, assoc. prof.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Registrations System for the Optical Signal of Laser Thermometer

The paper presents an electronic system for registration the optical signal of a laser thermometer. The structural and principal schemes of the signal registration system are given. The components of the system are defined.

Keywords: laser setup, thermometry, registration system

УДК 681.2.08

А. В. Иванов, студент
E-mail: mr.andreyvadimovich@mail.ru
Д. Г. Калюжный, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник
E-mail: dikdik@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование импульсной проводимости в резистивных пленках

Изучена поверхностная термоЭДС в толстых резистивных Ag–Pd-пленках при облучении их поверхности пучком лазера длиной волны 10,6 мкм. Показано, что участок поверхности толстой Ag–Pd-пленки, который облучается лазером, приобретает отрицательный заряд. Это обусловлено разделением зарядов в результате эффекта увлечения зарядов тепловыми фононами и их диффузии в сторону с меньшей температурой. Получена зависимость термоЭДС от координаты точек воздействия импульсов лазерного излучения на поверхность резистивных пленок.

Ключевые слова: резистивные пленки, лазерное излучение, серебро, палладий.

Введение

В настоящее время для изготовления элементов по толстопленочной технологии используются резистивные, диэлектрические и проводящие пасты. Они состоят из тонкодисперсных порошков металлов или их оксидов, стекла и органического связующего [1].

Толстостенные Ag–Pd-структуры используются как резистивные элементы. Пленки изготавливаются из тонкодисперсных порошков оксида серебра Ag_2O, палладия Pd и стекла марки С-660а [2].

Необходимость данной работы заключается в том, что датчики, которые создаются из резистивных пленок, должны быть стойкими к лазерным излучениям мощных лазеров.

В данной работе была исследована импульсная проводимость на поверхности толстых резистивных Ag–Pd-пленок под воздействием импульсного лазерного излучения.

© Иванов А. В., Калюжный Д. Г., 2018

Экспериментальные результаты

Для экспериментов использовались толстопленочные резистивные Ag–Pd-пленки размером 6×6 мм и толщиной 18–20 мкм, изготовленные из пасты ПР-100, были получены на керамической подложке ВК-94, на которой предварительно были сформированы толстопленочные электроды из проводниковой пасты ПП-3 [3]. Электроды используются для измерения сопротивления резистивных пленок и электрического сигнала, который индуцируется лазерным излучением.

Экспериментальные исследования поверхностной термо-ЭДС в Ag–Pd-пленках проводились при облучении их поверхности пучком лазерного излучения. В качестве источника изучения использовалась установка типа 8010 Trotec Speedy 100R C12 с CO_2-лазером с длиной волны 10,6 мкм, который работает в импульсном режиме.

Частота следования импульсов составляла 1 кГц. Чтобы предотвратить разрушение поверхности пленки сфокусированным излучением лазера, пленочный элемент располагался вблизи фокуса линзы. И на поверхность пленки подавалось излучение с диаметром точки приблизительно 1 мм. ЭДС с поверхности пленки снимали при помощи медных зондовых электродов. Сигнал от них проходил через усилитель, с коэффициентом усиления K_y =1000, подавался на осциллограф. Фиксировались максимальные значения термоЭДС, которые возникали между подведенным к поверхности резистивной пленки электродом и толстопленочным электродом на краю резистивной пленки. После каждого измерения точка воздействия импульсов лазера на поверхности резистивной пленки перемещалась с шагом 0,4 мм при помощи винта двухкоординатного столика. От начала пленки и до середины сигнал постепенно увеличивался до значения 60 мВ. Затем сигнал меняет свою полярность и от середины пленки до конца также наблюдается его увеличение в отрицательную сторону до значения –60 мВ.

Зависимость амплитуды термоЭДС от координаты точек воздействия импульсов лазерного излучения на поверхность резистивных пленок показана на рис. 1. Эти точки находятся на прямой, которая проходит через точку контактирования зондового электрода с резистивной пленкой.

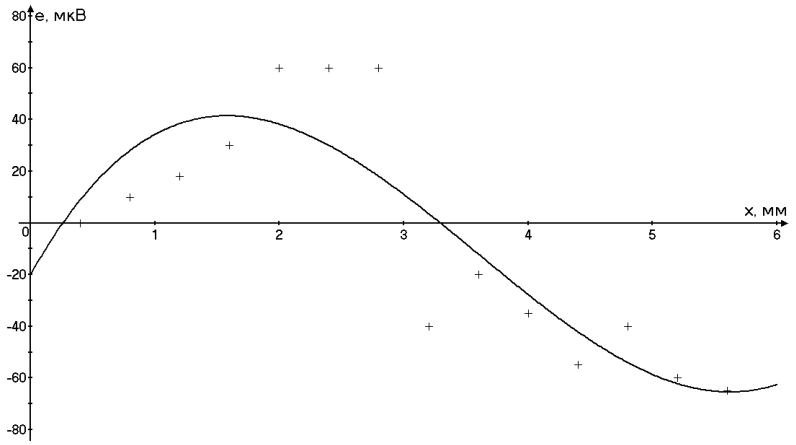


Рис. 1. Зависимость амплитуды *e* постоянной термоЭДС от координаты

Измерения поверхностной ЭДС в резистивной Ag–Pd-пленке при облучении импульсами CO_2-лазера, сигналы которой регистрировались с одного зондового электрода и толстопленочных электродов, показали, что закономерности изменения характера постоянной составляющей ЭДС от расположения точки воздействия луча лазера практически одинаковы.

Выводы

В работе были получены следующие результаты:

1. Проведены экспериментальные исследования поверхностной термоЭДС в резистивных Ag–Pd-пленках при облучении их поверхности пучком лазерного излучения;

2. Получена зависимость термоЭДС от координаты точек воздействия импульсов лазерного излучения на поверхность резистивных пленок.

Список литературы

1. *Смирнов, В. И.* Физико-химические основы технологии электронных средств : учеб. пособие. – Ульяновск : УлГТУ, 2005. – 112 с.

2. *Краснов, В. Г.* Толстопленочная технология в СВЧ микроэлектронике / В. Г. Краснов, Г. Б. Пертраускас, Ю. С. Чернозубов. – М. : Радио и связь, 1985. – 168 с.

3. *Александров, В. А.* Вихревой поверхностный ток в толстопленочном резисторе при воздействии лазером / В. А. Александров, Д. Г. Калюжный, Р. Г. Зонов // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, Вып.14. – С. 55–59.

A. V. Ivanov, student
E-mail: mr.andreyvadimovich@mail.ru
D. G. Kalyuzhny, CSc in engineering, senior researcher
E-mail: dikdik@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Study of Impulse Conduction in the Resistive Films

Studied the thermopower of the surface in thick Ag ─Pd resistive films during radiation of the surface with laser beam wavelength of 10.6 microns. It is shown that the surface area of a thick Ag─Pd-film that is irradiated by the laser, acquires a negative charge. This is due to the charge separation as a result of the drag effect of charges of thermal phonons and their diffusion in the direction of lower temperature. The dependence of the EMF from the coordinates of the points of impact of laser pulses on the surface of the resistive films.

Keywords: resistive films, laser radiation, silver, palladium.

УДК 535:530.182

А. Г. Корепанова, студент, лаборант
E-mail: a.g.korepanova@gmail.com
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск
Р. Ю. Кривенков, мл. науч. сотрудник
Г. М. Михеев, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Нелинейное поглощение в красных стеклянных фильтрах на длине волны 1064 нм*

Методом z-сканирования исследовано нелинейное пропускание красных стеклянных фильтров (ГОСТ 9411) на длине волны неодимового лазера в наносекундном диапазоне длительностей импульса. Установлено, что красные фильтры обладают нелинейным поглощением. Полученные экспериментальные результаты хорошо описываются в рамках теории двухфотонного поглощения. Определены нелинейные коэффициенты двухфотонного поглощения.

© Корепанова А. Г., Кривенков Р. Ю., Михеев Г. М., 2018

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-42-180147_р_урал_а).

Ключевые слова: нелинейное поглощение, z-сканирование, цветное оптическое стекло.

Введение

В настоящее время ведутся активные исследования нелинейных оптических материалов. Данные исследования актуальны, в частности, с точки зрения разработки и создания нелинейных оптических фильтров, предназначенных для защиты глаз и фотоприемных устройств от поражающего действия лазерного излучения [1, 2]. Интерес к изучению свойств цветных оптических стекол вызван их широким использованием в экспериментальной технике, а также их нелинейно-оптическими свойствами [3–5]. Известно, что стекла, легированные нанокристаллами полупроводников (квантовыми точками), находят применение не только в качестве оптических фильтров, но и в других целях, например, для восстановления изображения посредством обращения волнового фронта, бистабильного переключения в интерферометрах Фабри – Перо, оптических логических элементах и т. д.

Возможность использования цветных стекол для применения в задачах нелинейной оптики впервые была показана в работе [6], в которой исследовалась кубическая нелинейная восприимчивость цветных стеклянных фильтров методом вырожденного четырехволнового смешения. Фильтры представляли собой нанокристаллы полупроводников $CdS_{1-x}Se_x$ в стеклянной матрице. Эта работа положила начало активному исследованию нелинейно-оптических свойств цветного стекла.

К настоящему времени тщательно изучены цветные фильтры различных зарубежных производителей, таких как Corning, Shott, Hoya и др. Менее изучены российские фильтры из цветного стекла, выпускающиеся по ГОСТу. Несмотря на то, что некоторые из этих фильтров обладают выраженными нелинейно-оптическими свойствами [7, 8], в литературе отсутствует систематическая информация об их основных нелинейно-оптических характеристиках, таких, например, как коэффициент двухфотонного поглощения β.

Структура и свойства красного цветного стекла

Согласно ГОСТ 9411–81 красное оптическое стекло окрашено сульфоселенидами и сульфидами металлов. Результаты просвечивающей электронной микроскопии указывают на содержание в них значительного числа нанокристаллов $CdS_{1-x}Se_x$ с размерами порядка

1–100 нм [9]. Цвет наноструктур на основе $CdS_{1-x}Se_x$ зависит от соотношения концентраций S и Se в образцах (см. рис. 1).

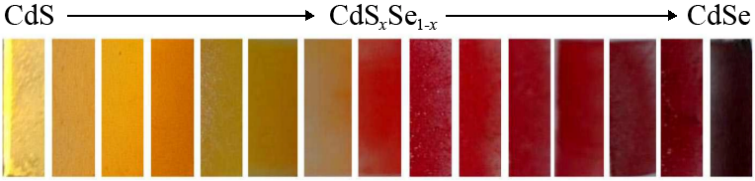


Рис. 1. Образцы $CdS_{1-x}Se_x$, нанесенные на подложку: слева – образец CdS, справа – CdSe. Слева направо цвет постепенно меняется от желтого до темно-красного [10]

Кривые спектрального пропускания стекол, легированных нанокристаллами полупроводников, имеют характерную резкую границу пропускания (см. рис. 2). По характеру спектральной кривой коэффициента пропускания красных оптических стекол, а именно по сильному поглощению на длине волны 532 нм, можно предположить, что на длине волны 1064 нм в них может наблюдаться двухфотонное поглощение.

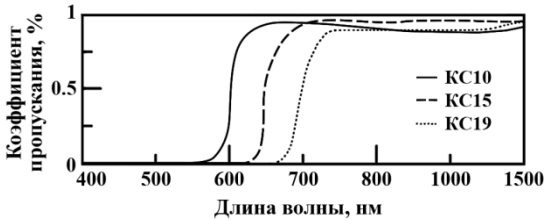


Рис. 2. Спектральные кривые коэффициента пропускания красных стекол толщиной 5 мм (ГОСТ 9411–81)

Описание эксперимента

В данной работе исследовались фильтры КС10, КС11, КС13, КС14, КС15, КС17, КС18 и КС19 толщиной 5 мм. Исследование нелинейного поглощения в красных стеклянных фильтрах проводилось методом *z*-сканирования с открытой диафрагмой на автоматизированной лазерной установке, описанной в [11]. В экспериментах использовался одномодовый YAG:Nd^{3+}-лазер [12] с пассивной модуляцией добротности, генерирующий гладкие световые импульсы дли-

тельностью 21,2 нс на длине волны 1064 нм. Схема эксперимента представлена на рис. 3.

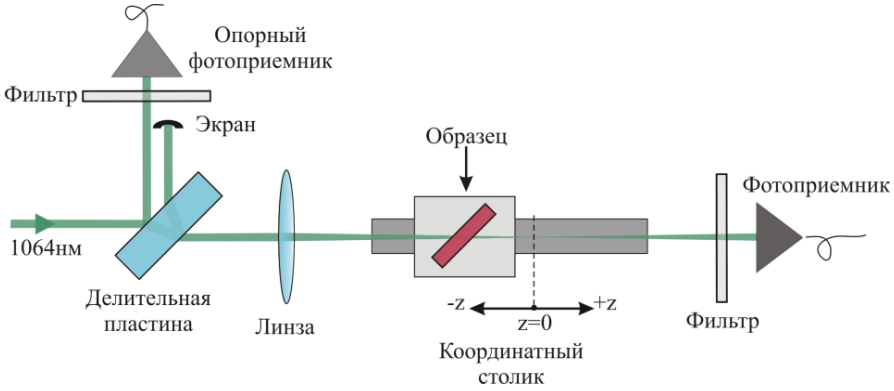


Рис. 3. Схема эксперимента

Исследуемый образец перемещался вдоль оси лазерного пучка, сфокусированного линзой (f = 150 мм). При этом во избежание влияния интерференции на регистрируемый сигнал фильтр располагался под углом 45° к падающему пучку [11]. Таким образом, толщина исследумых образцов L составляла 7 мм. Радиус пучка в перетяжке w_0 = 57,1 мкм, длина Рэлея z_0 = 9,6 мм ($z_0 = \pi w_0^2/\lambda$). Нелинейный коэффициент пропускания T определялся по формуле $T = E_{out}/E_{in}$, где E_{out} – энергия импульса после прохождения образца, регистрируемая фотоприемником, E_{in} – энергия падающих импульсов, измеряемая опорным фотоприемником.

Исследуемые цветные стеклянные фильтры удовлетворяют условию $L < z_0$, необходимому для проведения экспериментов методом z-сканирования.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Кривые нормированного коэффициента пропускания $T_n = T/T_0$ (T_0 – линейный коэффициент пропускания) исследуемых стекол представлены на рис. 4. В данных экспериментах энергия импульса составляла 820 мкДж.

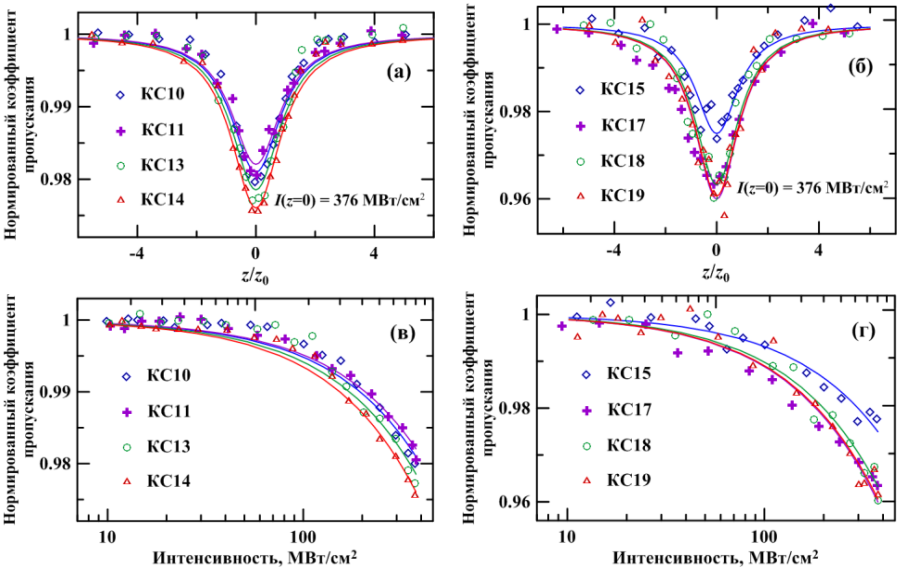


Рис. 4. Зависимости нормированных коэффициентов пропускания исследуемых стекол от их положения относительно перетяжки (*а*, *б*) и от интенсивности излучения (*в*, *г*)

Для аппроксимации экспериментальных данных использовались следующие выражения, описывающие распространение светового импульса в среде с двухфотонным поглощением [13]:

$$\alpha = \alpha_{ns} + \beta I(z), \quad (1)$$

$$dI(z) = -\alpha I(z)dz, \quad (2)$$

где $I(z)$ – интенсивность падающего излучения, зависящая от координаты z; α_{ns} – линейный коэффициент поглощения; β – коэффициент двухфотонного поглощения.

Уменьшение коэффициента пропускания (см. рис. 4) с увеличением интенсивности падающего излучения указывает на наличие нелинейного поглощения.

Коэффициенты нелинейного поглощения β вычислены по экспериментальным данным z-сканирования с открытой диафрагмой по формуле, описывающей двухфотонное поглощение при z-сканировании [13]:

$$T(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left[-q_0(z)\right]^m}{(m+1)^{3/2}}, \qquad (3)$$

где $q_0 = \beta I_0 L_{eff} /(1 + z^2/z_0^2)$, I_0 – интенсивность в области перетяжки пучка, L_{eff} – эффективная длина, определяемая как $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha_{ns} L)]/\alpha_{ns}$.

Расчетные значения коэффициентов двухфотонного поглощения β красных фильтров серии КС, полученные при аппроксимации экспериментальных данных *z*-сканирования, представлены в таблице. Здесь же представлены соответствующие значения ширины запрещенной зоны E_g, взятые из [8]. Из данных таблицы видно, что β уменьшается с увеличением E_g.

Расчетные коэффициенты двухфотонного поглощения β и ширины запрещеной зоны E_g красных стеклянных фильтров

Марка стекла	КС10	КС11	КС13	КС14	КС15	КС17	КС18	КС19
β, 10^{-3} см/МВт	0,32	0,29	0,35	0,39	0,44	0,69	0,63	0,65
E_g, эВ [8]	2,001	–	–	–	1,960	1,925	1,930	1,915

Следует отметить, что коэффициенты двухфотонного поглощения для фильтров КС, определенные по экспериментальным данным *z*-сканирования в пикосекундном диапазоне длительностей импульса на длине волны 1054 нм [5], примерно в 10 раз меньше значений, полученных нами. Этот результат согласуется с данными, представленными в [14]: указано, что значение кубической нелинейной восприимчивости уменьшалось при воздействии более коротких лазерных импульсов.

Выводы

Таким образом, методом *z*-сканирования показано, что во всех цветных фильтрах марки КС (ГОСТ 9411–81) в наносекундном диапазоне длительностей лазерных импульсов на длине волны излучения 1064 нм наблюдается двухфотонное поглощение. При плотности мощности около 380 МВт/см^2 нормированный коэффициент пропускания фильтров толщиной 5 мм, расположенных под углом 45° к оси лазерного пучка, уменьшается на 2–4 %.

Список литературы

1. Graphene and its derivatives for laser protection / Y. Chen, T. Bai, N. Dong [et al.] // Progress in Materials Science. – 2016. – Vol. 84. – Pp. 118–157.

2. Concentration dependence of the optical limiting and nonlinear light scattering in aqueous suspensions of detonation nanodiamond clusters / V. V. Vanyukov, G. M. Mikheev, T. N. Mogileva [et al.] // Optical Materials. – 2014. – Vol. 37, no. 12. – Pp. 218–222.

3. *Malyarevich, A. M.* Semiconductor-doped glass saturable absorbers for near-infrared solid-state lasers / A. M. Malyarevich, K. V. Yumashev, A. A. Lipovskii // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103, no. 8. – P. 081301.

4. *Singh, C. P*. Nonlinear optical studies in semiconductor doped glasses under femtosecond pulse excitation / C. P. Singh, K. S. Bindra, S. M. Oak // Pram. J. Phys. – 2010. –Vol. 76, no. 6. – Pp. 1169–1173.

5. Two-photon absorption and nonlinear refraction in commercial colour glass filters / K. S. Bindra, R. Chari, V. Shukla [et al.] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 1998. – Vol. 1, no. 1. – Pp. 73–76.

6. *Jain, R. K.* Degenerate four-wave mixing in semiconductor-doped glasses / R. K. Jain, R. C. Lind // J. Opt. Soc. Am. – 1983. – Vol. 73, no. 5. – Pp. 647–653.

7. Nonlinear absorption, linear optical properties and structure of CdS_xSe_{1-x} microcrystallites in glass matrix / V. P. Gribkovskii, R. G. Zaporozhchenko, V. A. Zyulkov [et al.] // Superlattices and Microstructures. – 1991. –Vol. 10, no. 4. – Pp. 441–446.

8. *Kulish, N. R.* Optical properties of quasi-zero-dimensional CdS_xSe_{1-x} crystallites grown in a glass matrix / N. R. Kulish, V. P. Kunets, M. P. Lisitsa // Opt. Eng. – 1995. – Vol. 34, no. 4. – Pp. 1054–1071.

9. Resonant Raman studies of compositional and size dispersion of $CdS_{1-x}Se_x$ nanocrystals in a glass matrix / Yu. M. Azhniuk, A. G. Milekhin, A. V. Gomonnai [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2004. – Vol. 16, no. 49. – Pp. 9069–9082.

10. The excitonic photoluminescence mechanism and lasing action in band-gap-tunable $CdS_{1-x}Se_x$ nanostructures / J. Dai, P. Zhou, J. Lu [et al.] // Nanoscale. – 2016. – Vol. 8, no. 8. – Pp. 804–811.

11. Z-сканирование при монохроматической лазерной накачке: исследование насыщенного поглощения в суспензии многослойных углеродных нанотрубок / Г. М. Михеев, Р. Ю. Кривенков, К. Г. Михеев [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 48, № 8. – С. 719–725.

12. Автоматизированная лазерная система для диагностики водорода в газовых смесях / Г. М. Михеев, Т. Н. Могилева, А. Ю. Попов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2003. – Т. 46, № 2. – С. 201–207.

13. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam / M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. H. Wei [et al.] // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1990. – Vol. 26, no. 4. – Pp. 760–769.

14. *Yamane, M.* Glasses for photonics / M. Yamane, A. Yoshiyuki. – Cambridge University Press, 2000. – 271 p.

A. G. Korepanova, student, laboratory assistant
E-mail: a.g.korepanova@gmail.com
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia
R. Y. Krivenkov, junior researcher
G. M. Mikheev, DSc in phys. and math., head of the laboratory
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia

Nonlinear Absorption in Red Glass Filters at 1064 nm

Nonlinear absorption in red glass filters (GOST 9411) were investigated by z-scan measurement using YAG:Nd nanosecond laser pulses. The two-photon absorption coefficients β were determined. The experimental results are in good agreement with the theory of two-photon absorption.

Keywords: nonlinear absorption, z-scan, colored optical glass.

УДК 669.018.5

М. Ю. Лебедева, канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник
E-mail: gl-marina@mail.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Изучение свойств магнетиков с помощью нелинейного электромагнитно-акустического преобразования*

Проведено экспериментальное изучение особенности возбуждения ультразвуковых волн электромагнитным способом на удвоенной частоте в монокристаллическом гадолинии. Обнаружена существенная разница проявления ангармонизма магнитоупругого взаимодействия для разных процессов перемагничивания, наблюдаемых в различных магнитных фазах. Экспериментально показана возможность возбуждения колебаний ультразвука на удвоенной частоте в отсутствие магнитного поля за счет процессов вращения в угловой фазе, когда плоскость поляризации магнитного поля совпадает с плоскостью конуса легких осей.

Ключевые слова: электромагнитно-акустическое преобразование, ультразвук, магнитострикция, нелинейность.

© М. Ю. Лебедева, 2018

*Работа выполнена в ФТИ УрО РАН по бюджетной тематике, № гос. регистрации АААА-А17-117022250037-0.

Введение

В основе явления электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) в магнетиках лежит магнитоупругое взаимодействие, являющееся нелинейным процессом. Ангармонизм магнитупругого взаимодействия может проявляться в генерации высших гармоник ультравука или в генерации колебаний на комбинационных частотах [1]. Нелинейные эффекты присущи всем процессам перемагничивания. Однако для различных магнитных структур и вблизи магнитных фазовых переходов различных типов эти эффекты могут иметь свои особенности. Одним из удобных объектов изучения особенностей нелинейного ЭМАП является Gd, поскольку в нем в довольно узком интервале температур реализуются несколько типов магнитных структур путем магнитных фазовых переходов. При температуре Кюри T_c = 290 К гадолиний переходит из парамагнитного состояния в одноосное ферромагнитное состояние (реализуется так называемая «лёгкоосная фаза»), далее вблизи температуры $T_{сп}$ = 220 К (точка спиновой переориентации) реализуется ферромагнитная фаза с конусом легких осей (или «угловая фаза») [2].

Описание эксперимента

В работе экспериментально исследована электромагнитная генерация ультразвуковых волн на удвоенной частоте в монокристалле Gd. Генерация четных гармоник может быть реализована и в остсутствии постоянного магнитного поля. Эта особенность методики ЭМАП важна, например, при изучении магнитных фазовых переходов, поскольку магнитное поле размывает и смещает их по температуре [2].

Образец для измерений был вырезан в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами 0,41 см, 0,56 см и 0,76 см, у которого ось шестого порядка совпадала с нормалью к наибольшей грани образца. Измерения проводились по имульсному способу. Импульсный ток с частотой заполнения 5 МГц подавали на плоскую спиральную катушку сплошной намотки, которая устанавливалась над одной из наибольших граней образца. К противоположной грани был приклеен пьезокварц *X*-среза с резонансной частотой 10 МГц, с помощью которого регистрировали картину многократных отражений продольного ультразвука между этими гранями.

Спиральная катушка создает на поверхности образца радиально поляризованное тангенциальное электромагнитное поле. При отсутст-

вии магнитного поля нелинейность магнитоупругого взаимодействия в геометрии $h \perp n \| c \| q_l$ (где n – нормаль к наибольшей грани образца, q_l – волновой вектор продольной волны) должна привести к генерации продольного ультразвука на удвоенной частоте, что и было зарегистрировано на эксперименте.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Температурная зависимость эффективности ЭМАП второй гармоники представлена на рис. 1. Узкий экстремум вблизи точки Кюри связан с вкладом изотропной магнитострикции парапроцесса. Подобный результат ранее был получен для поликристаллических образцов никеля и инварных сплавов [3]. Обращает на себя внимание факт, что в отличие от линейного ЭМАП (генерация ультразвука на частоте электромагнитного поля) [4] вклад парапроцесса в генерацию второй гармоники при $H_o = 0$ наблюдается лишь в непосредственной близости к точке Кюри. При линейном ЭМАП ($H_o \neq 0$) парапроцесс инициируется приложенным магнитным полем, поэтому его вклад проявляется и достаточно далеко от T_c.

В интервале температур $T_{сп} \le T < T_c$ (легкоосная фаза – см. рис. 2, *а*) генерацию второй гармоники за счет анизотропной магнитострикции парапроцесса зафиксировать не удалось. Как было показано на примере Co [5], в легкоосной фазе генерация звука на удвоенной частоте может происходить за счет движения 180-градусных доменных границ. При $H_o = 0$ перемагничивание одноосного магнетика под воздействием переменного магнитного поля осуществляется только за счет процессов смещения 180-градусных доменных границ. В результате колебательного движения 180-градусных границ около положения равновесия с частотой ω в области перемагничивания возникают магнитострикционные деформации на удвоенной частоте. Этот процесс может происходить лишь при параллельной ориентации вектора $\vec{h}$ и оси c. В рассматриваемой конфигурации эксперимента переменное поле ориентировано перпендикулярно оси легкого намагничивания ($\vec{h} \perp c \| \vec{M}_s$). Все домены находятся по отношению к $\vec{h}$ в энергетически равнозначных условиях. Поэтому нет движения доменных границ и отсутствует пик генерации при переходе легкая ось – угловая фаза ($T_{сп} = = 220$ К), наблюдавшийся в кобальте [5].

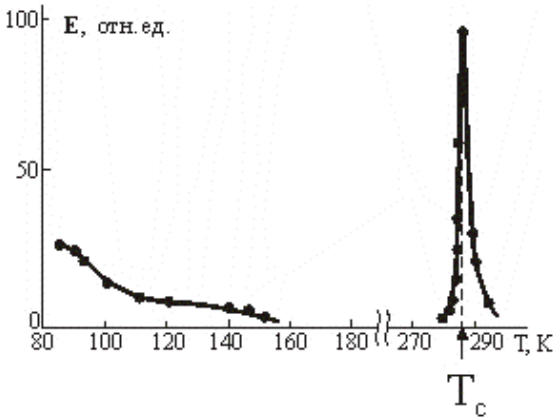


Рис. 1. Температурная зависимость эффективности ЭМАП второй гармоники в монокристалле гадолиния

При дальнейшем понижении температуры, в угловой фазе $T < T_{\text{сп}}$, генерация продольного звука на удвоенной частоте возобновляется в районе $T \approx 160$ К (см. рис.1), причем, эффективность ЭМАП по мере уменьшения температуры растет. Сложную доменную структуру Gd в угловой фазе при $H_o = 0$ можно представить в виде двух типов усредненных доменов, вектор $\vec{M}_s$ которых образует два противоположно направленных конуса (рис. 2, *б*). В том случае, когда одноосный магнетик находится под воздействием линейно поляризованного тангенциального переменного поля, действующего в базисной плоскости, модулируется лишь угол f в базисной плоскости. Вращение вектора $\vec{M}_s$ вокруг гексагональной оси в легкой плоскости, как было ранее нами замечено на примере Co, не должно приводить к магнитоупругим деформациям. В то же время радиально поляризованное поле, использованное в эксперименте, может привести к изменению в доменах угла q между вектором $\vec{M}_s$ и осью c при сохранении конусной структуры. Причем вращение проекции намагниченности на горизонтальную ось $m_z(\omega)$ из-за чётности явления магнитострикции приводят к одинаковым пропорциональным $Q_{zz} m_z(\omega)^2$ (Q_{zz} – магнитоупругая постоянная) деформациям на удвоенной частоте в доменах обоих типов.

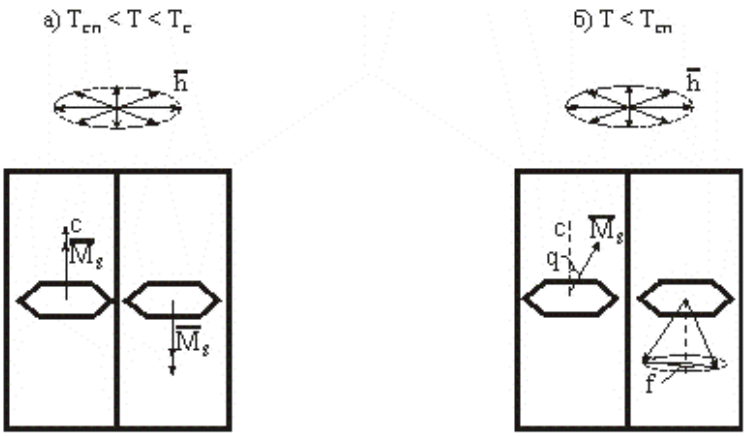


Рис. 2. Схематическое изображение доменной структуры гадолиния различных магнитных фаз: *а* – $T_{сп} < T < T_c$; *б* – $T < T_{сп}$

Выводы

Таким образом, полученный экспериментальный материал показывает, что в одноосных магнетиках в угловой фазе генерация второй гармоники ультразвука за счет анизотропной магнитострикции процессов вращения возможна и в отсутствие внешнего магнитного поля. Для этого плоскость поляризации радиально поляризованного переменного магнитного поля должна совпадать с легкой плоскостью.

Список литературы

1. *Ильясов, Р. С.* Импульсное электромагнитно-акустическое преобразование высших гармоник поверхностных волн в ферромагнетиках / Р. С. Ильясов, С. Э. Бабкин // Дефектоскопия. – 1995. – № 8. – С. 53–60.

2. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках / К. П. Белов, А. К. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитин. – М. : Наука, 1979. – 317 с.

3. *Ильясов, Р. С.* Электромагнитная генерация высших ультразвуковых гармоник вблизи точки Кюри / Р. С. Ильясов, В. А. Комаров, В. В. Мерзляков // ФММ. –, 1992. – № 1. – С. 148–150.

4. Электромагнитное возбуждение звука в металлах / А. Н. Васильев, В. Д. Бучельников, С. Ю. Гуревич, М. И. Каганов, Ю. П. Гайдуков. – Челябинск ; М. : Изд-во ЮрГУ, 2001. – 339 с.

5. *Ильясов, Р. С.* Электромагнитная генерация второй гармоники ультразвука в кобальте в районе спиновой переориентации / Р. С. Ильясов, М. Ю. Главатских // ФММ. – 1999. – Т. 88, вып. 2. – С. 72–75.

M. Yu. Lebedeva, CSc in phys. and math., researcher
E-mail: gl-marina@mail.ru
Physical-Technical Unstitute UB RAS, Izhevsk, Russia

Investigation of the Magnets Properties by the Nonlinear Electromagnetic-Acoustic Transformation

The peculiarities of the excitation of ultrasound waves at the double frequency using by the electromagnetic method in monoctrystalline gadolinium were experimentally studied. Significant differences in the manifestation of anharmonicity of the magnetoelastic interaction for the different magnetic phases were found. Possibility of the excitation of ultrasonic vibrations at double frequency in the absence of magnetic field were experimentally shown. This is possible due to the rotation processes of the magnetization in angular phase, when the plane of the magnetic field polarization coinsides with the plane of the easy-axis cone.

Keywords: electromagnetic-acoustic transformation, ultrasound, magnetostriction, nonlinearity.

УДК 535.542.1

М. А. Мазин, магистрант
E-mail: maksim-mazin@inbox.ru
В. Д. Паранин, канд. физ.-мат. наук, доц.
E-mail: vparanin@mail.ru
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара

Измерение оптической разности хода градиентной линзы на основе астигматического преобразования пучка Бесселя

Апробирован метод исследования оптической разности хода механически свободных градиентных параболических линз на основе астигматического преобразования пучка ***Бесселя*** *0-го порядка. Отмечены особенности юстировки оптической схемы и приведены практические рекомендации по выбору ее элементов. На примере четвертьволновой линзы экспериментально показана возможность надежного измерения оптической разности хода не хуже*

© Мазин М. А., Паранин В. Д., 2018

0,05λ. Подтверждено существенное отличие двулучепреломления градиентных оптических линз в центральной и краевой областях.

Ключевые слова: двулучепреломление, четвертьволновая параболическая градиентная линза, пучок Бесселя, оптическая разность хода.

Введение

В настоящее время градиентные линзы нашли широкое применение в системах световодной связи и передачи информации, а также в области передачи и формирования изображений. Градиентные линзы (граданы) – это оптические элементы с заданным радиальным распределением показателя преломления.

Одной из проблем волоконно-оптических информационно-измерительных систем является случайное двулучепреломление составляющих оптических элементов, которое неконтролируемо влияет на поляризацию излучения, характеристики волоконных датчиков и величины измеряемых сигналов. Двулучепреломление также свойственно градиентным линзам и это объясняет снижение эффективности ввода излучения в оптическое волокно [1]. Следовательно, контроль двулучепреломления является важной практической задачей, способствующей повышению точности и достоверности передаваемой информации в волоконно-оптических и оптико-электронных системах.

Постановка задачи

Существующие поляризационно-интерференционные методы оптической разности хода обладают невысокой чувствительностью. В то время как интерференционные методы более точные, но требуют высококачественной оптомеханики, дорогостоящей оптики, обеспечения виброизоляции и сложны в юстировке оптической схемы [2–4]. В публикациях [5–7] предложен новый метод исследования двулучепреломления на основе преобразования лазерных пучков Бесселя в анизотропных средах.

Целью настоящей работы являлось измерение оптической разности хода градиентных оптических линз на основе астигматического преобразования пучка Бесселя.

Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Она содержит гелий-неоновый лазер, пространственный фильтр – расширитель пучка, четвертьволновую пластину λ/4, дифракционный аксикон, четвертьволновую градиентную линзу (градан), изображающий микрообъектив, ПЗС-матрицу.

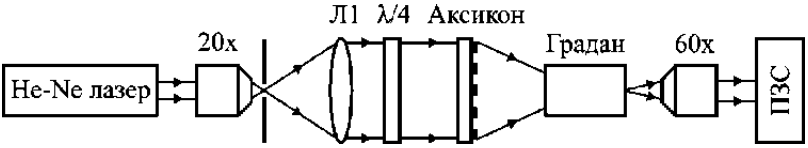


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Настройка оптической схемы заключалась в координатном центрировании аксикона, градана и микрообъектива на оптической оси.

Для измерения двулучепреломления необходимо ориентировать поляризатор параллельно оптической оси образца. При фиксации изображений был отмечен их азимутальный поворот, монотонно зависящий от расстояния между микрообъективом и граданом. На рис. 2 показаны выходные пучки на различных расстояниях между микрообъективом и выходной поверхностью градана (для удобства сравнения на рис. 2 изображения повернуты до одинакового положения). Так, для случая рис. 2, *а* угол поворота составил 30°, а для рис. 2, *е* – 10°.

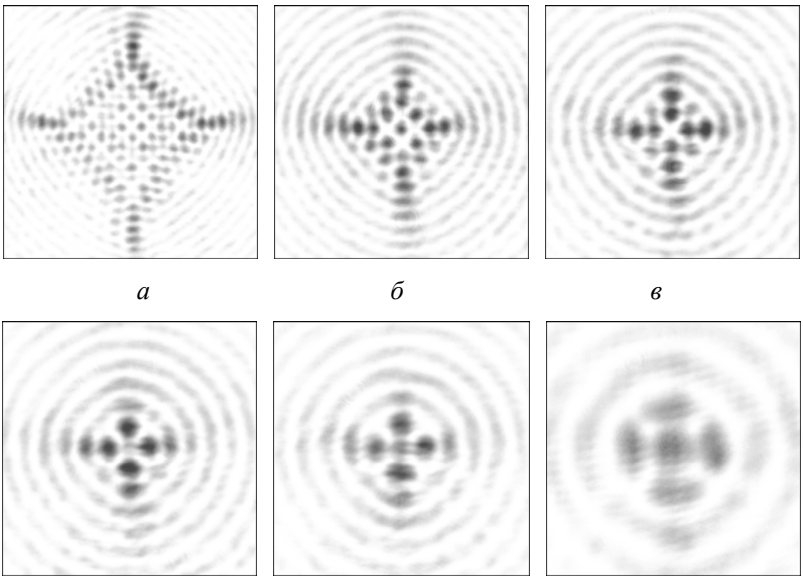


Рис. 2. Выходные пучки при различных расстояниях «микрообъектив – градан»: *а*) *l* = 4 мм; б) *l* = 4,75 мм; в) *l* = 5,50 мм; г) *l* = 6,25 мм; д) *l* = 7 мм; е) *l* = 11 мм

Однако азимутальное положение быстрой и медленной осей градана заранее неизвестно. Поэтому использовалась четвертьволновая фазовая пластина, формирующая круговую поляризацию освещающего пучка.

Параболическая градиентная линза имела параметры: радиус 2 мм, радиальный градиент показателя преломления $g = 0{,}1475$ мм$^{-1}$ на длине волны $\lambda_0 = 633$ нм, длина градана $L = 10{,}65 \pm 0{,}05$ мм (четвертьволновая линза $L = 0{,}25P$, где $P = 2\pi/g$).

Обсуждение результатов

Для сколлимированных пучков Бесселя, прошедших приосевую часть градана, астигматическое преобразование относительно невелико (рис. 2, *г–е*). Пучки Бесселя, прошедшие краевые области градана и сфокусированные вблизи выходной поверхности, подвержены большему астигматическому преобразованию (рис. 2, *а–в*). Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают наличие минимальной оптической разности хода в центральной области градана и наибольшей – в его краевых областях. Сравнение полученных данных (рис. 2) с результатами исследований [7] также указывает на преимущественно радиальное двулучепреломление, аналогичное одноосным кристаллам *а*-среза.

Экспериментальный метод в приведенном виде можно отнести к методам сравнения. Качественное сравнение двулучепреломления граданов одной длины осуществляют по виду астигматического преобразования пучка Бесселя при одинаковых расстояниях «микрообъектив – градан». Минимальное двулучепреломление соответствует наименьшему астигматическому изменению пучка.

Выводы

Предложенный метод близок к поляризационной микроскопии. Отличием реализации метода является замена конденсорной линзы на дифракционный аксикон, а широкополосного осветителя на когерентный лазерный источник. Определение оптической разности хода основано на подсчете числа точечных максимумов и измерении их интенсивности вместо измерения числа и цветности полос в поляризационной микроскопии. Повышение чувствительности метода к двулучепреломлению образца заключается в увеличении углов падения оптического излучения. Это достигается простым уменьшением пространственного периода дифракционного аксикона.

Список литературы

1. *Alferov, S. V.* Study of polarization properties of fiber-optics probes with use of a binary phase plate / S. V. Alferov, S. N. Khonina, S. V. Karpeev // JOSA A. – 2014. – Vol. 31 (4). – P. 244.

2. *Rouke, J. L.* Birefringence measurements in gradient-index rod lenses / J. L. Rouke, D. T. Moore // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38 (31). – Pp. 6574–6580.

3. *Wei, Su*. Birefringent properties of diametrically loaded gradient-index lenses / Su Wei, J.A. Gilbert // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35 (24). – Pp. 4772–4781.

4. Bessel beam transformation by anisotropic crystals / D. H. Zusin, R. Maksimenka, V. V. Filippov et al. // J. Opt. Soc. Am. A. – 2010. – Vol. 27 (8). – Pp. 1828–1833.

5. Исследование поляризационного преобразования и взаимодействия обыкновенного и необыкновенного пучков в непараксиальном режиме / С. Н. Хонина, В. Д. Паранин, С. В. Карпеев, А. А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38 (4). – С. 598–605.

6. *Паранин, В. Д.* Измерение толщины Z-срезов одноосных кристаллов на основе лазерных пучков Бесселя // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40 (4). – С. 594–599.

7. *Paranin, V. D.* Diffractive polarization illuminator for a two-axis fiber-optic angle sensor / V. D. Paranin, S. N. Khonina // Proc. of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – P. 1034216.

M. A. Mazin, magister student
E-mail: maksim-mazin@inbox.ru
V. D. Paranin, CSc in phys. and math., associate professor
E-mail: vparanin@mail.ru
Samara National Research University, Samara, Russia

Measurement of Optical Path Difference of the Gradient Lens on the Basis of Astigmatic Transformation of the Bessel Beam

The method of experimented investigation has been used to test a birefringence of mechanically free gradient parabolic lenses. Method based on the astigmatic transformation of the 0-order Bessel beam. The features of the alignment of the optical circuit and the adoption of practical recommendations for the selection of its elements are noted. An example of a quarter-wave lens has shown experimentally the possibility of reliable measurement of the optical path difference ~ 0.05λ. Significant difference of birefringence of gradient lenses in the central and edge regions has demonstrated.

Keywords: birefringence, quarter-wave parabolic gradient lens, Bessel beam, an optical path difference.

УДК 681.2.08

Н. А. Рубцова, студент
E-mail: nina.rubtsova.95@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
Д. Г. Калюжный, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
E-mail: dikdik@mail.ru
И. Н. Бурнышев, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.
В. А. Александров, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Лазерное модифицирование поверхности Ag-Pd-пленок

Произведена локальная лазерная модификация серебро-палладиевой пленки в среде водорода. Получен график зависимости возникающей термоЭДС от координаты на поверхности пленки с модифицированным участком. Показано, что на границе между модифицированным участком и немодифицированным происходит скачок сигнала.

Ключевые слова: резистивные пленки, модификация поверхности, лазерное излучение, серебро, палладий.

Введение

Вопрос выбора датчиков для получения пространственных, временных, спектральных и энергетических параметров лазерного излучения остается актуальным в настоящее время. Высокая мощность применяемых в промышленности лазерных излучателей требует подбора стойких материалов для их изготовления [1, 2]. Резистивные серебряно-палладиевые пленки обладают сравнительно большей стойкостью, чем большинство фотоприемников, и выдерживают лазерное излучение с достаточно высоким уровнем мощности.

Сведения из теории

Серебряно-палладиевые резисторы изготавливаются из резистивных паст, в состав которых входит органическая связка, тонкодисперсные порошки оксида серебра Ag_2O, палладий Pd и стекло марки С-660а, полученные по известным технологиям [3]. В зависимости от процентного соотношения составляющих получают резисторы с различным сопротивлением. Свойства основного наполнителя (металла и

© Рубцова Н. А., Калюжный Д. Г., Бурнышев И. Н., Александров В. А., 2018

его производных) определяют свойства получаемой в дальнейшем пленки [4, 5].

Полученная резистивная пленка состоит из композиции стекла, сплава серебра и палладия и оксида палладия, что подтверждено рентгеноструктурным анализом [6].

В промежутках между частицами сплава серебра и палладия находится оксид палладия. Его присутствие было подтверждено восстановлением металлического палладия на поверхности пленки в среде водорода. В процессе термической обработки материала резистивной пасты, наряду с образованием частиц сплава Ag-Pd и оксида палладия PdO, между этими частицами формируются и переходные слои металл – полупроводник p-типа, обладающие свойством барьера Шоттки. Это позволяет использовать их в качестве фотопреобразователей [7].

Из литературы [6] известно, что был проведен ряд экспериментов, целью которых являлось исследование влияния водорода на проводящие свойства Ag-Pd толстопленочных резисторов, т. к. при реакции с водородом PdO может восстанавливаться до Pd.

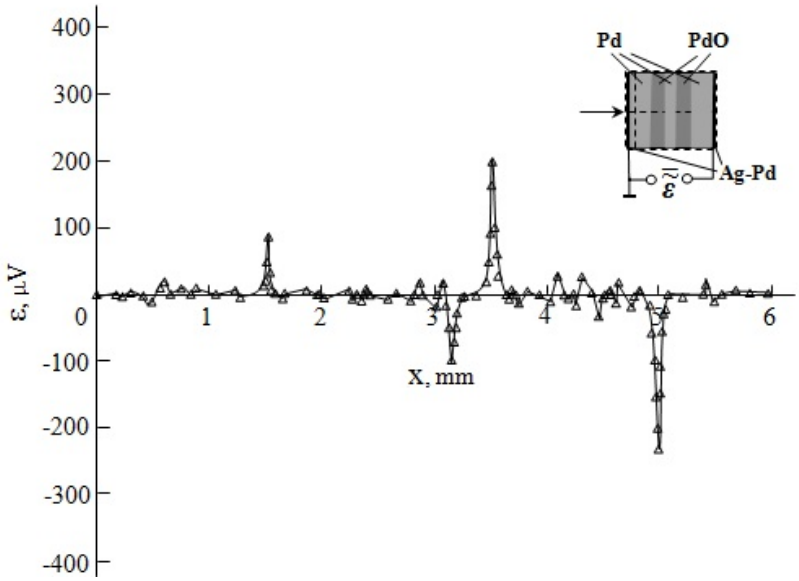
Описание эксперимента

В проводимом эксперименте использовалась серебро-палладиевая пленка ПР-100 размером 6×6 мм, поверхность которой была модифицирована следующим образом: пленка помещалась в среду водорода и локально нагревалась с помощью лазера, в результате чего на поверхности под действием водорода происходило восстановление палладия из оксида палладия. Таким образом, на поверхности пленки были образованы три модифицированные полосы металлического палладия. Длина волны излучения CO_2 лазера 10,6 мкм.

Далее модифицированная пленка помещалась в механическую двухкоординатную систему, которая размещалась на координатном столе лазерной установки. Лазерный пучок был подведен к левому краю пленочного резистора. Частота следования импульсов лазерного излучения была программно установлена 100 Гц. Начиная с данной координаты были сняты полученные значения ЭДС.

Результаты и их обсуждение

В результате эксперимента были получены данные, показанные в виде графика на рисунке.



Зависимость термоЭДС от координаты пятна лазера в резисторе
с тремя модифицированными участками

Из рисунка видно, что график зависимости возникающей термоЭДС от координаты на поверхности пленки с модифицированным участком имеет пики. Минимальное и максимальное значения ЭДС возникают на границе между модифицированной поверхностью, которая состоит из Pd, и немодифицированной, состоящей из PdO. Таким образом, в данной координате пучок лазера воздействует частично на Pd и частично на PdO. Данные материалы образуют термопару, обладающую определенным значением разности потенциалов. Примечательно, что в середине модифицированной полосы сигнал становится нулевым. Это объясняется тем, что лазерное излучение попадает только на металл, который, соответственно, обладает металлической проводимостью. В данном случае сопротивление составляет единицы Ом и, соответственно, величина сигнала очень мала, следовательно, ЭДС не наблюдается. Изменение знака сигнала обусловлено инверсией ориентации термопары.

Также имеются небольшие пики. Для того чтобы объяснить их наличие, необходимо вернуться к рассмотрению структуры серебропалладиевой пленки. Поверхность пленки имеет зернистую структуру. Зерна имеют размеры, сравнительно меньшие, чем пятно, сформиро-

ванное лазерным излучением, поэтому в поле воздействия лазерного пучка могут попасть от двух различных зерен. Вследствие этого частицы, на которые попадает лазерное излучение, также образуют дополнительные термопары.

Из литературы [8] известно, что аналогичный результат, но с меньшим эффектом, достигается и при длине волны лазерного излучения 532 нм.

Выводы

Таким образом, под действием лазерного излучения в серебропалладиевых резистивных пленках возникает термоЭДС. Проведенные исследования указывают на возможность применения серебропалладиевых резистивных пленок в качестве чувствительных датчиков движения и вибрации. Также пленки могут служить носителями скрытой информации.

Список литературы

1. *Анисимова, И. Д.* Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Заитов. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

2. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов / Р. Дж. Киес, П. В. Крузе, Э. Г. Патли, Д. Лонг, Г. Р. Цвикер, А. Ф. Милтон, М. К. Тейч. – М. : Радио и связь, 1985. – 328 с.

3. *Хаяк, Г. С.* Промышленные изделия из благородных металлов и сплавов : справочник / Г. С. Хаяк, А. А. Куранов, М. А. Чебыкин. – М. : Металлургия, 1985.

4. *Смирнов, В. И.* Физико-химические основы технологии электронных средств : учеб. пособие. – Ульяновск : УлГТУ, 2005.– 112 с.

5. *Томилин, В. И.* Физико-химические основы технологии электронных средств. – М. : Академия, 2010. – 416 с.

6. *Александров, В. А.* Влияние водорода на проводимость Ag-Pd толстопленочных резисторов / В. А. Александров, Д. Г. Калюжный, Е. В. Александрович // Письма в ЖТФ. – Т. 39. – Вып. 1. – СПб., 2013. – С. 88–94.

7. *Боднарь, И. В.* Фотоэлектрические свойства барьеров Шоттки In/n-$CuIn_5Se_8$ / И. В. Бондарь, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь // Журнал прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 73, № 4. – С. 502–505.

8. *Александров, В. А.* Термо-ЭДС в Ag-Pd толстопленочных резисторах при воздействии сфокусированным излучением полупроводникового лазера // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 1. – С. 129–139.

N. A. Rubcova, magister student
E-mail: nina.rubtsova.95@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia
G. G. Kalyuzhny, SCs in engineering, senior researcher
E-mail: dikdik@mail.ru
I. N. Burnyshev, CSc in engineering, leading researcher
V. A. Aleksandrov, CSc in phys. and math., senior researcher
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia

Laser modification of the surface of Ag-Pd films

A local laser modification of the Ag-Pd film in a hydrogen medium is performed. A graph of the emerging thermo-emf as function of the coordinate of the surface of a film with a modified section is obtained. It is shown that a signal jump occurs at the boundary between the modified section and the unmodified one.

Keywords: resistive films, surface modification, laser radiation, silver, palladium

УДК 621.375.826

А. Н. Селезнев, магистрант
E-mail: sasha.seleznev.95@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
Д. Г. Калюжный, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
И. Н. Бурнышев, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.
Институт механики УрО РАН, г. Ижевск

Лазерная система контроля материала нефтегазопровода

Проведены исследования образцов стали Ст20 и ШХ15 на водородопроницаемость с применением метода термокондуктометрии. Рассмотрено применение лазерной системы для контроля водорода, диффундирующего через стенку нефтегазопровода.

Ключевые слова: водород, охрупчивание, трубопровод, диффузия, лазер.

Введение

Водород – самое распространенное вещество во Вселенной. На его долю приходится примерно 88,6 % всех атомов. На Земле его доля

© Селезнев А. Н., Калюжный Д. Г., Бурнышев И. Н., 2018

составляет 17 % от всех атомов. Практически весь водород находится в различных соединениях, в качестве примесей. Простое вещество водород – это легкий бесцветный газ. Водород может оказывать негативное влияние на различные материалы.

Сведения из теории

Находясь в составе природного газа, который доставляется по трубам, водород может охрупчивать материал труб, что ведет к последующему его разрушению [1]. Методы контроля водорода, растворенного в металлах, основаны на нагревании или плавлении образца, т. е. являются разрушающими. Если же речь идет о материале трубопровода, то такой подход не позволяет осуществить экспрессный контроль, а только периодическое исследование. Однако косвенным образом можно регистрировать состояние металла по составу газовой смеси, диффундирующей через стенку трубопровода. Лазерные методы спектроскопии газовых смесей в этом случае позволяют добиться высокой точности, проводить измерения в реальном масштабе времени и, что немаловажно, автоматизировать весь процесс [2].

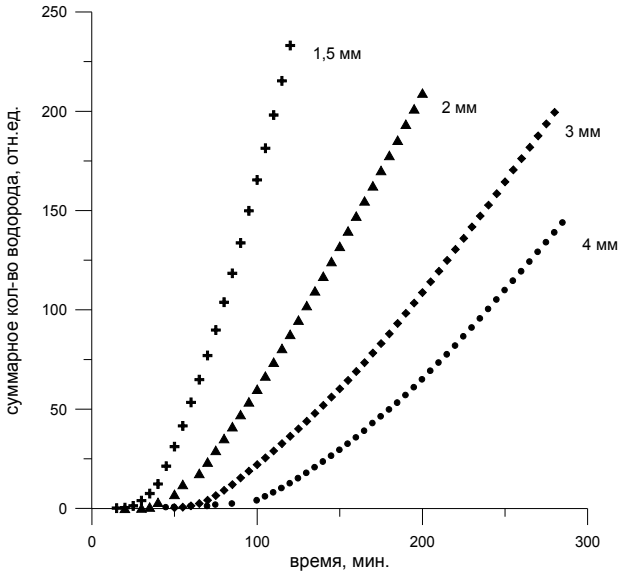
Описание эксперимента

Процесс диффузии водорода через стальные образцы исследовался на сталях марок Ст20 и ШХ15. В специально изготовленную ячейку помещался пластинчатый стальной образец. С одной стороны образца электрохимическим методом создавалась водородосодержащая среда [3].

На другой стороне образца регистрировался поток диффундирующего водорода. Анализ прошедшего водорода осуществлялся с применением анализатора водорода Galileo G8H (Bruker) [4].

Зависимости суммарного количества водорода, прошедшего через образцы различной толщины за определенные промежутки времени, представлены на рисунке.

Максимальное суммарное количество водорода, выделившегося за одинаковые промежутки времени испытаний, получено на образцах толщиной 1,5 мм. По мере роста толщины образцов количество прошедшего водорода уменьшается. Различные углы наклона представленных графиков обусловлены снижением скорости диффузии водорода при увеличении толщины образца, что, в свою очередь, позволит рассчитать коэффициент диффузии водорода через рассматриваемый образец [5].



Суммарное количество водорода, прошедшее через образцы стали Ст20 различной толщины

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для регистрации потока водорода с успехом может быть применен метод когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС). Данный метод подразумевает наличие когерентных лазерных пучков, зондирующих исследуемую водородосодержащую среду [6]. Уровень современной техники позволяет получить бигармоническую лазерную накачку в достаточно компактном и малоэнергоемком устройстве. Создание герметичной кюветы для сбора контролируемой смеси газов, оснащенной оптическими окнами для прохождения лазерного излучения, и системы регистрации оптического сигнала также осуществимо на современной элементарной базе [7]. Таким образом, возможно создание компактного, мобильного, автоматизированного комплекса контроля состояния металла трубопровода, который возможно устанавливать в требуемом месте транспортной магистрали с целью получения данных в реальном масштабе времени.

Метод позволяет обеспечить чувствительность 1–5 молекул детектируемого газа на миллион других молекул [8].

Выводы

В работе описаны эксперименты со образцами стали марок Ст20 и ШХ15 на водородопроницаемость. Для регистрации водорода был предложен метод когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС).

Список литературы

1. *Либенсон, М. Н.* Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика) / М. Н. Либенсон, Е. Б. Яковлев, Г. Д. Шандыбина // Поглощение лазерного излучения в веществе / под общ. ред. В. П. Вейко. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2008. – С. 55–59.

2. *Бруннер, В.* Справочник по лазерной технике. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 544 с.

3. *Бурнышев, И. Н.* Мониторинг потоков катодного водорода через металлические мембраны / И. Н. Бурнышев, Д. Г. Калюжный // Химическая физика и мезоскопия. – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 71–75.

4. Исследование методов лазерной спектроскопии и разработка высокочувствительных лазерных газоанализаторов / В. П. Андрианов, К. В. Бандуркин, О. М. Брехов, А. Н. Волгин, Г. Н. Игнатьев. – Рос. хим. ж. – 2001. – № 5-6, С. 73–77.

5. Датчик водорода : пат. 2525643 Рос. Федерация : G01N 27/14, Т. С2 / Александров В. А., Калюжный Д. Г., Бурнышев И. Н. – Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.

6. *Звелто, О.* Принципы лазеров / пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. – 4-е изд. – СПб. : Лань, 2008. – 720 с.

7. Лазерная техника и технология : учеб. пособие для вузов : в 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 159 с.

8. *Фарзане, Н. Г.* Автоматические детекторы газов / Н. Г. Фарзане, Л. В. Илясов. – М. : Энергия, 1972. – 168 с.

A. N. Seleznev, magister student
E-mail: sasha.seleznev.95@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia
D. G. Kalyuzhny, CSc in engineering, senior researcher
I. N. Burnyshev, CSc in engineering, leading researcher
Institute of Mechanics UB RAS, Izhevsk, Russia

Laser System for Monitoring the Material of the Oil and Gas Pipeline

The samples of steel St20 and ShKh15 were tested for hydrogen permeability using the method of thermal conductometry. The application of a laser system for controlling hydrogen diffusing through the wall of an oil and gas pipeline is considered.

Keywords: hydrogen, embrittlement, pipeline, diffusion, laser.

УДК 502.656

В. П. Усольцев, канд. техн. наук, вед. Инженер
E-mail: vpusoltcev@mail.ru
О. И. Уразманова, студент
E-mail: urazmanova94@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Контроль загрязнений сточных вод с использованием лазерного зондирования

Статья содержит технические предложения по контролю аварийных сбросов загрязнений в сточные воды предприятий. Ошибки и технические неполадки на предприятиях вызывают локальные загрязнения окружающей среды. Многочисленные аварийные ситуации стали неотъемлемой частью эксплуатации промышленного оборудования. Предлагаемый метод позволит выявить и управлять незапланированными сбросами в сточные воды, распознавать вид и уровень загрязнения и осуществлять контроль над ними.

Ключевые слова: оптическая плотность, контроль загрязнения сточных вод, очистка сточных вод

Введение

Вода является ценным природным ресурсом. Потребность в ней постоянно растет. Человеку, животным и растениям она необходима для поддержания жизни, некоторым животным служит средой обитания, все чаще воду используют различные промышленные предприятия и сельское хозяйство.

Проблема дефицита чистой воды выходит на мировой уровень. Человеческое здоровье напрямую зависит от ее качества. Причиной дефицита пресной воды является рост населения, загрязнение водоемов из-за неразумного отношения к охране водных ресурсов. Особенно сильное влияние на загрязнение оказывают промышленные предприятия.

Существующие системы очистки сточных вод не обеспечивают полного извлечения загрязняющих веществ (в частности, большинство фильтров не предназначены для очистки стоков от маслянистых веществ). В случае непреднамеренного аварийного кратковременного сброса маслянистых веществ дорогостоящие устройства фильтрации могут быть повреждены или качество очистки будет ниже.

© Усольцев В. П., Уразманова О. И., 2018

Сегодня многочисленные аварийные ситуации стали неотъемлемой частью эксплуатации оборудования. Можно сказать, что катастрофичной стала обычная производственная деятельность [1]. При обзоре литературы выделено несколько наиболее вероятных причин аварийных сбросов (рис. 1).

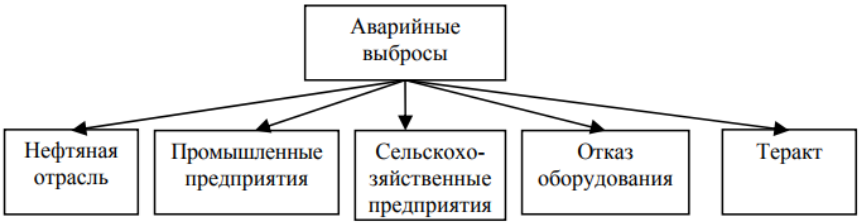


Рис. 1. Наиболее вероятные причины аварийных выбросов

Для обеспечения безопасности населения нужно применять технические средства контроля за внезапным загрязнением рек. Аварийные выбросы представляют собой сгусток неоднородной жидкости в основной трубе, отводящей сточную воду к фильтрам.

Контроль загрязнений сточных вод оптико-электронными методами

Выбор оптимального метода определения состава жидкости зависит от различных факторов: физико-химических свойств образца, концентрации определяемого компонента, а также от постановки задачи – требуемой точности, допустимых времени и стоимости анализа.

Эти методы можно разделить на химические и физические. В основе химических методов лежит изменение химического состава веществ при добавлении в них соответствующих реагентов. В процессе химической реакции может изменяться окраска, агрегатное состояние, масса или другие объективно измеряемые параметры, на основе чего определяют содержание исследуемого вещества.

Большинство стандартизованных методов являются именно химическими. Их отличает достоверность, высокая точность. Вместе с этим химическим методам присущ ряд недостатков: они требуют расхода химических реактивов, как правило, высокочистых и дорогостоящих, зачастую, опасных для здоровья, занимают длительное время, для их реализации требуется квалифицированный персонал и оборудованная лаборатория, эти методы с трудом поддаются автоматизации.

Многих перечисленных выше недостатков лишены оптические методы анализа. Оптико-электронные приборы позволяют производить бесконтактные измерения. Оптические методы контроля обладают высокой чувствительностью и легко автоматизируются.

Данные методы различаются в зависимости от характера взаимодействия анализируемого вещества со световой энергией, способа ее измерения и спектральных характеристик используемой оптоэлектронной измерительной аппаратуры [2].

Оптические методы исследований классифицируют следующим образом: рефрактометрия, люминесцентный анализ, спектроскопия, поляризационный анализ, фотометрия и нефелометрия, микроскопия, рефлектометрия, Фурье-анализ.

Более простыми являются методы, основанные на определении интегральных характеристик оптического излучения – интенсивности прошедшего (фотометрия) и рассеянного под некоторым углом (нефелометрия) изучения.

В основе предполагаемого метода лежит способность подавляющего большинства органических веществ различных классов поглощать свет.

При определенной длине волны можно контролировать содержание органических соединений в сбрасываемых стоках. Чтобы определить эту длину волны, необходимо получить спектр поглощения. Рассмотрим наиболее популярные загрязнители, попадающие в сточные воды из-за аварийных выбросов, – нефть, масло.

Масло хорошо поглощает излучение ультрафиолетового диапазона, его максимальный пик 690 нм. Наибольшее поглощение нефти находится в диапазоне от 0,28 до 0,38 мкм, максимальный пик 340 нм.

В результате анализа спектров поглощения загрязнителей в виде нефти, масел выбран рабочий диапазон от 0,34 до 0,69 мкм. В этом диапазоне вода достаточно прозрачна, что позволяет оптическому излучению проникать на большую глубину, а следы загрязнений, даже небольшого размера, хорошо различимы [3].

В соответствии с длиной волны масла $\lambda_1 = 0{,}69$ мкм и длиной волны нефти $\lambda_2 = 0{,}34$ мкм выбран фотоприемник ФДК-155, подходящий для двух случаев. В соответствии с выбранными параметрами $\lambda_1 = 0{,}69$ мкм, $\lambda_2 = 0{,}34$ мкм наиболее подходящими лазерами для двух случаев являются полупроводниковые, т. к. они излучают в УФ-, видимом и ИК-диапазонах (0,32–32 мкм), в качестве активной среды применяются полупроводниковые кристаллы.

Проведение исследований на экспериментальной установке дало некоторые результаты. Эксперименты проводились на трех источниках: синем, красном, зеленом. Некоторые результаты представлены в виде графиков (рис. 2 и 3).



а



б



в

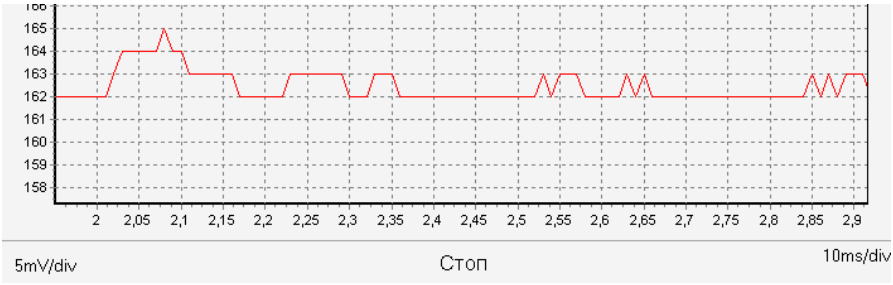
Рис. 2. Графики изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде нефти и различными источниками излучения: *а* – зеленый источник излучения, *б* – синий источник излучения, *в* – красный источник излучения



а



б



в

Рис. 3. Графики изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде масла и различными источниками излучения: *а* – красный источник излучения, *б* – зеленый источник излучения, *в* – синий источник излучения

Применяя различные лазерные излучатели, наглядно видны результаты изменения оптической плотности. Данное наблюдение позволит определить наиболее подходящие источники лазерного излучения, которые будут удовлетворять необходимым для нас условиям.

Защита водных ресурсов от загрязнения – это проблема, требующая безотлагательного решения. Целесообразно устранять загрязне-

ния не доводя их до фильтров очистки. Для этого и существуют различные методы анализа и обработки, которые в случае обнаружения веществ в воде отправляют их не по каналу, который ведет к фильтрам, а к отстойнику, где и будет проводиться дальнейший анализ и отчистка.

Выводы

В ходе работы были решены следующие задачи:

- Результаты исследований использованы для лабораторной установки контроля загрязнений сточных вод
- Разработана методика формирования базы данных оптической плотности неоднородных жидких оптических сред на разных частотах излучения.
- По результатам исследований опубликовано три работы, материалы докладывались на Международных и Всероссийских конференциях.

Список литературы

1. *Шахраманьян, М. А*. Уральский регион России, опасности природного, техногенного и экологического характера / М. А. Шахраманьян, В. А. Акимов, К. А. Козлов // Экология и промышленность России. – 2002. – № 3.– С. 4–21.

2. *Алексеев, В. А.* Контроль загрязнений сточных вод и промышленных стоков с использованием двухчастотного лазерного зондирования / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран // Безопасность в техносфере. – 2017. – № 1. – С. 3–9.

3. *Алексеев, В. А.* Система интерполяционного контроля загрязнений сточных вод природно-промышленных территориальных комплексов / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран // Приборостроение – 2016 : материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., 23–25 нояб. 2016 г., Минск, Республика Беларусь / пред. редкол. О. К. Гусев ; ред. Гурина Е. В. [и др.]. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 15–16.

V. P. Usoltsev, CSc in engineering, leading engineer
E-mail: vpusoltcev@mail.ru
O. I. Urazmanova, student
E-mail: urazmanova94@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Pollution Control of Wastewater Using Laser Sensing

The article contains technical proposals for the control of accidental discharges of pollution into the waste water of enterprises. Errors and technical problems at the enterprises cause local environmental pollution. Numerous emergency situations have become an integral part of industrial equipment operation. The proposed method allows to identify and manage unplanned discharges into wastewater, to recognize the type and level of pollution and to exercise control over them.

Keywords: optical density, wastewater pollution control, wastewater treatment.

УДК 502.656

В. П. Усольцев, канд. техн. наук, вед. инженер
О. И. Уразманова, студент
E-mail: urazmanova94@mail.ru
С. Ф. Гарифуллин, Г. А. Фомин, студенты
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Разработка методики для формирования экспериментальной базы данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий

В данной статье рассматривается проблема загрязнений сточных вод промышленных предприятий. Разработана методика формирования базы данных для систематизирования различных загрязнений сточных вод в режиме реального времени с помощью метода трехчастотного зондирования. Проведены эксперименты и получены результаты, подтверждающие состоятельность предлагаемого метода.

Ключевые слова: оптическая плотность, контроль загрязнения сточных вод, очистка сточных вод.

Введение

В последнее время наблюдается явный дефицит чистой воды. Причинами дефицита пресной воды является рост населения, загрязнение природных водоемов. Особенно сильное влияние на загрязнение водоемов оказывают сточные воды промышленных предприятий. В силу необходимости минимизировать и предотвратить неблагоприятное

© Усольцев В. П., Уразманова О. И., Гарифуллин С. Ф., Фомин Г. А., 2018

действие разного рода вредных и опасных веществ на водную среду используют управление качеством сточных вод [1,2].

Целями управления качеством сточных вод являются:

- соблюдение на выпусках систем канализации промышленных предприятий значений допустимых концентраций загрязняющих веществ и общих свойств сточных вод,
- защита сетей и сооружений систем канализации населенных пунктов от нарушений регламентов их эксплуатации,
- недопущение загрязнения поверхностных и поземных источников водоснабжения.

Для достижения этих целей разрабатываются и утверждаются условия спуска сточных вод, которые содержат данные, включенные в качестве примера в базу данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий.

Целью работы является разработка методики формирования базы данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий. При этом были учтены следующие требования:

- учет неоднородности программной среды (использование для решения конкретных задач различных программ и программного обеспечения);
- обеспечение распределенного характера организации информационных ресурсов;
- повышение безопасности хранения и использования данных;
- учет наличия многоуровневых режимов управления и справочников;
- обеспечение эффективности хранения и обработки очень больших объемов информации.

На основе анализа основ и путей решения, используемых при создании баз данных, сделан выбор средств управления базой данных для реализации с учетом потребностей и возможностей пользователя использовались программные продукты фирмы «Microsoft».

При разработке структуры базы данных использована методика обеспечения быстрого поиска объектов по заданным требованиям. Для этого предложена иерархическая структура, основанная на разбиении диапазона изменения оптической плотности водных сред при всех возможных разновидностях жидких растворов всех уровней загрязнений.

Постановка задачи

При формировании базы данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий необходимо учитывать:

- виды и значения нормативных показателей общих свойств сточных вод, принимаемых в системы канализации населенных пунктов и сбрасываемых в природные водоемы, позволяющих избежать агрессивного воздействия загрязнений (температура, pH, кратность разбавления, общая минерализация, взвешенные вещества, сульфиды, ХПК, $БПК_5$, ХПК, $БПК_{20}$),
- перечень и значения концентраций веществ, удаляемых в процессе очистки, с указанием их признака вредности, допустимой концентрации, достигаемой эффективности удаления в воде водного объекта,
- перечни и значения концентраций загрязняющих веществ, не удаляемых в процессе очистки.

Пример представления кривых изменения оптической плотности водных сред в базе данных с учетом полной структуры связей информационных массивов представлен на рис. 1 [1].

Первый уровень охватывает все жидкие среды [2]:

Второй уровень:

0. Воду

1. Водные растворы.

Третий уровень, полученный путем разделения второго уровня, содержит шесть основных видов:

три вида воды:

0.1. Дистиллированная вода.

0.2. Водопроводная вода.

0.3. Вода из природных источников.

Три вида растворов:

1.1. Механическое загрязнение.

1.2. Химическое загрязнение.

1.3. Биологическое и бактериологическое загрязнение.

Последующие уровни получаются путем деления предыдущего уровня на соответствующее количество частей.

1.1. Механическое загрязнение:

1.1.1. Песок.

1.1.2. Рудные включения.

1.1.3. Глинистые включения.

1.1.4. Растворы минеральных солей.

1.1.5. Растворы щелочей.

1.1.6. Растворы кислот.
1.2. Химическое загрязнение:
1.2.1. Неорганические примеси.
1.2.2. Органические примеси.
1.3. Биологическое и бактериологическое загрязнение:
1.3.1. Патогенные микроорганизмы.
1.3.2. Грибы.
1.3.3. Мелкие водоросли.

Пятый уровень получается путем деления предыдущего уровня на соответствующее количество частей:

1.2.2. Органические примеси:
1.2.2.1. Фенолы.
1.2.2.2. Альдегиды.
1.2.2.3. Смолы.
1.2.2.4. Аммиак.
1.2.2.5. Нефтепродукты.

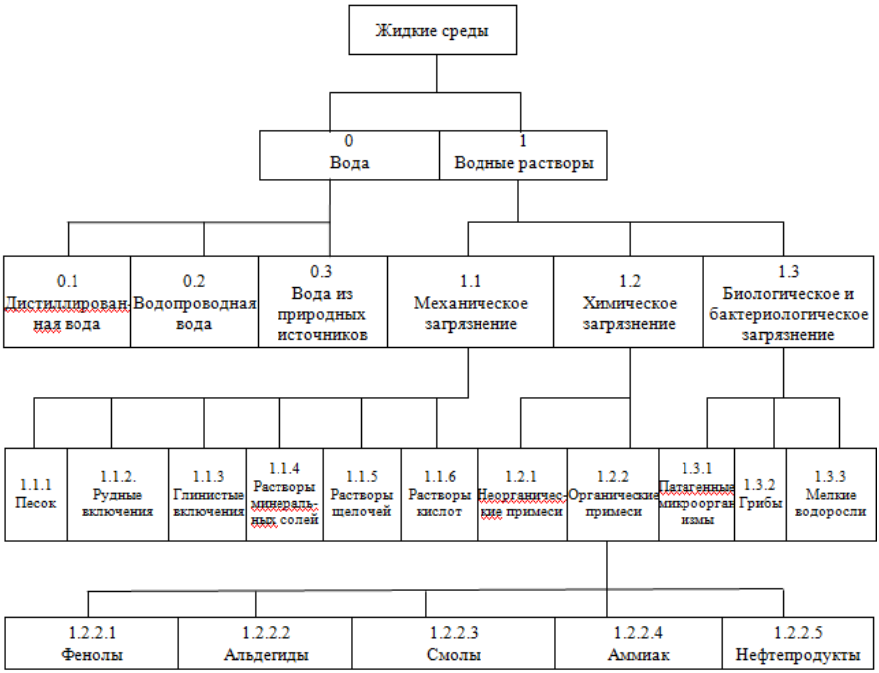


Рис. 2. Общая архитектура формирования БД на основе функциональной принадлежности, операционной базы и информационных массивов

При формировании базы данных кривых изменения оптической плотности водных сред для каждого диапазона был выбран наиболее характерный, типичный и распространенный вид, на который было:

- составлено стандартизированное описание кривой изменения оптической плотности, проведены индексирование и унификация документа (введены классификационные индексы, предметные рубрики, ключевые слова, дескрипторы), составлена аннотация, сформирован блок дополнительной (уточняющей) информации (концентрация водных растворов, температурный режим, виды и режимы работы измерительной аппаратуры и т. д.);
- **данные введены в БД,** составлена пояснительная запись (вид, метод, условия измерений, погрешность, точность, достоверность, воспроизводимость результатов, чувствительность, номинальное значение, диапазон изменения величин, уровень автоматизации измерительной аппаратуры и т. д.) на машиночитаемом носителе (ввод данных в БД, заполнение полей экранной формы в избранном формате), установлен контроль и редактирование машиночитаемой записи (проверка правильности введенной информации).

Описание эксперимента

Для обозначения начальных условий формирования экспериментальной базы данных загрязнений сточных вод промышленных предприятий проведены измерения на лабораторной установке контроля оптической плотности жидких сред [3]. Эксперименты проводились на следующих режимах:

- ток излучателя 8 мА;
- усиление фотоусилителя 121;
- усилитель-делитель 6,6;
- напряжение смещения 2,161 В.

Поочередно через смеси (отдельно, при различных концентрациях, нефть + вода, масло + вода) мы пропускали излучения красного (длина волны 630 нм), синего (длина волны 450 нм), зеленого (длина волны 510 нм), цветов**.** Графики изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде нефти и различными источниками излучения представлены на рис. 2.

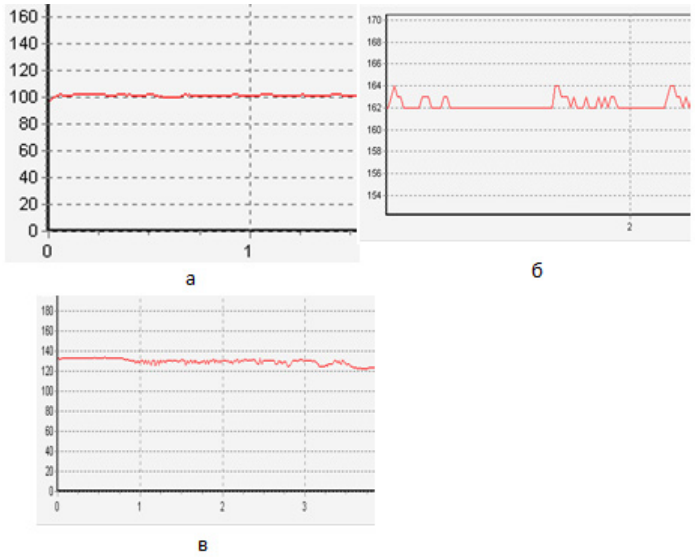


Рис. 2. Графики изменения оптической плотности при протекании загрязнения в виде нефти и различными источниками излучения: *а* – зеленый источник излучения, *б* – синий источник излучения, *в* – красный источник излучения

Результаты и их обсуждение

Сравнительная таблица полученных результатов

	Зеленый	Синий	Красный	Красный при токе 33 мА
Вода	600	600	400	600
Масло	800	600	400	600
Вода+Масло	775	600	400	600
Вода+масло в динамике	775	700	400	650
Нефть	450	600	700	600
Нефть+ масло	500	650	700	600
Нефть+масло в динамике	500	675	700	650

В результате проделанной работы разработана методика, с использованием которой создана широкая и универсальная база данных, составлены пояснительные записи с указанием вида, метода, условий измерений, погрешности, точности, достоверности, воспроизводимо-

сти результатов, чувствительности, номинального значения, диапазона, уровня автоматизации работы измерительной аппаратуры и т. д. на машиночитаемом носителе, установлен контроль и редактирование машиночитаемой записи.

Использование сформированной базы данных для обработки результатов экспериментов устанавливает полную пригодность и устойчивую работоспособность разработанной базы данных по контролю изменений оптической плотности водных сред для решения поставленных задач по выбору режимов и отработке технологии контроля аварийных выбросов в сточных водах промышленных предприятий. Аппаратная часть и программное обеспечение универсальны, согласованы по протоколам обмена данными и полностью адаптированы между собой.

База данных позволяет задать условия для обнаружения наличия смеси и, соответственно, контролировать аварийные выбросы в сточных водах. Для повышения информативности, повышения применяемости и универсальности базы данных необходима дальнейшая доработка аппаратной части, совершенствование программного обеспечения, формирование информационных массивов по биологическим и бактериологическим загрязнениям (код 1.3.), например, по мелким водорослям (код 1.3.3.).

Выводы

Таким образом, после проделанных экспериментов по пропусканию излучений разных длин волн через отдельные жидкости и их смеси метод трехчастотного зондирования можно считать состоятельным для детектирования загрязнений вод промышленных предприятий. Уровень сформированной базы данных полон и достаточен для учета начальных условий, индивидуальных особенностей, погрешностей и помех при контроле жидких сред, растворов и смесей, записи, хранения и практического применения кривых изменения оптической плотности водных сред.

Список литературы

1. *Алексеев, В. А*. Разработка теоретических и методических основ управления аварийными сбросами в технологическом процессе очистки сточных вод в контексте социо-эколого-экономической системы крупного предприятия / В. А. Алексеев, В. П. Усольцев, С. И. Юран // Прибростроение-2014 :

материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. (19–21 нояб. 2014 г., Минск, Республика Беларусь). – Минск : БНТУ, 2014. – С. 20–22.

2. *Усольцев, В. П.* Достоверность санитарно-эпидемиологического анализа сточных вод при большом количестве случайных воздействий и отсутствии доминирующего фактора / В. П. Усольцев, С. И. Юран // Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – № 3. – С. 19–24.

3. Пат. 153362 Российская Федерация, ППК G01N15/06. Устройство устранения аварийного выброса / Алексеев В. А., Девятов Н. А, Юран С. И., Усольцев В. П. – № 2014141487 ; заявл. 14.10.2014, опубл. 18.06.2015, Бюл. № 20.

V. P. Usoltsev, CSc in engineering, leading engineer
O. I. Urazmanova, student
E-mail: urazmanova94@mail.ru
S. F. Garifullin, G. *A. Fomin,* students
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

The Development of a Methodology for the Creation of an Experimental Database of Sewage Pollutions of Industrial Enterprises

In this article, the problem of sewage pollution of industrial enterprises is considered. The technique of creation of a database for systematization of various sewage pollutions in real time using the method of three-frequency sensing is developed. Experiments were carried out and results were obtained confirming the consistency of the proposed method.

Ключевые слова: optical density, wastewater pollution control, wastewater treatment.

УДК 621.373.826

А. В. Усольцева, соискатель
E-mail: ajieksa_oo@mail.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Исследование поверхности обугливаемых материалов при лазерной обработке

Проведенные исследования показали, что глубина проникновения излучения в материал, среднее значение микронеровностей, среднее квадратическое отклонение микронеровностей и коэффициент корреляции микронеровностей при изменении мощности лазерного излучения достаточны для оценки качества поверхностного слоя материалов с обугливанием. Для получения качественного поверхностного слоя с четким и контрастным изображением для материалов с обугливанием поверхности с любым спектром пропускания и поглощения необходимо использовать рекомендованные режимы работы лазерной установки при наибольшей допустимой мощности излучения и скорости гравирования.

Ключевые слова: технологический процесс, промышленные изделия, обугливаемые материалы, лазерная обработка, лазерное оборудование, качество поверхности.

Введение

В современном производстве качество продукции обеспечивается выполнением соответствующих требований к качеству составляющих, подразумевают точность выполнения технических условий, технологических режимов, размеров, отклонений от формы, взаимного расположения, состояния обработанных поверхностей.

Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности можно представить моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), связанной с природой материала и условиями образования поверхности, полученной после обработки. В настоящее время наиболее распространена обработка поверхности (гравирование и т. д.) на фрезерных станках с ЧПУ, имеющих традиционное векторное управле-

© Усольцева А. В., 2018

ние. Однако в этом случае производительность процесса остается крайне низкой, а управляющая программа является сложной и большой по объему. Все эти станки являются двухкоординатными, а третья координата в лучшем случае воспроизводится как пассивная следящая система, т. е. третья координата неуправляема и определяется энерго-временными параметрами лазерного излучения. Точка контакта лазерного луча с поверхностью материала подвергается быстрому изменению в зависимости от глубины поверхностной обработки, вследствие чего происходит расфокусирование излучения и тем самым теряется качество обработки поверхности [1].

Одной из новых технологий, которая может обеспечить высокую производительность при резком уменьшении объема управляющей программы, является лазерное компьютерное станочное растровое гравирование плоских изделий.

Сведения из теории

В основном воздействие лазерного луча на материалы связано с нагревом материала до температуры плавления. В этом случае оптимальной длиной волны излучения является, исходя из закона Вина, длина волны максимального значения кривой Планка для данной температуры. По закону Кирхгофа это длина волны максимума излучения и максимума поглощения.

В промышленном производстве используются различные материалы. Наиболее распространенными, используемыми во многих сферах исходя из эстетической и экологической точек зрения, являются натуральные материалы. В процессе термического воздействия ряд материалов подвергается обугливанию – процессу изменения органических остатков, сопровождающемуся их почернением, уменьшением содержания водорода и кислорода и увеличением углерода.

Тем не менее для поверхностной обработки материалов с обугливанием лазерное излучение применяется недостаточно широко из-за отсутствия апробированных методик, наличия дополнительных требований по эстетическим свойствам, таким как форма, рисунок, фактура и цвет.

Центральное место в лазерной поверхностной обработке занимают физико-химические процессы. Параметры физико-химических процессов находятся в прямой зависимости от следующих факторов: характеристик лазерного луча как инструмента, характеристик обрабатываемого материала, условий взаимодействия лазерного излучения с материалом. Процессы лазерной поверхностной обработки являются многофакторными и многокритериальными. Управлять процессом,

меняя все факторы, невозможно. Поэтому из всех названных факторов нужно выделить основные, которые будут называться управляющими. К таким факторам следует отнести:

- мощность лазерного излучения (энергия лазерного излучения, частота следования импульсов, длительность импульса, форма импульса);
- время облучения (непрерывное излучение – скорость обработки, импульсное излучение, частота и длительность импульса);
- диаметр пятна фокусирования;
- распределение мощности по облучаемой поверхности.

При использовании систем управления пространственным перемещением (по определенному закону) лазерного луча для получения максимальной передачи энергии излучения появляется еще ряд управляющих параметров:

- закон пространственного перемещения лазерного луча;
- частота импульсов управления;
- амплитуда управляющего импульса;
- поглощательная способность материала;
- угол падения лазерного излучения на материал.

Все остальные факторы необходимо учитывать при разработке конкретного технологического процесса. Для этого надо их измерять, знать закономерности их изменения в различных условиях. Управление процессом поверхностной обработки обеспечивается изменением трех основных технологических параметров – мощности излучения, скорости обработки и диаметра пятна фокусирования, которые обеспечивают, в совокупности с остальными, требуемые характеристики теплового состояния поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя при лазерной обработке, как и при других видах обработки, определяется шероховатостью обрабатываемой поверхности и состоянием материала поверхностного слоя. Шероховатость поверхности характеризуется высотой и формой микронеровностей, а состояние материала – его физико-химическими изменениями, микроструктурой и остаточными напряжениями.

Связь качества поверхностного слоя с технологическими параметрами лазерной обработки можно выразить аналитически с использованием метода корреляционно-регрессионного анализа. В процессе статистических исследований зависимостей определяется глубина причинно-следственной связи между явлениями, что позволяет выявлять факторы (признаки), оказывающие основное влияние на вариа-

цию изучаемых явлений и процессов. При этом важную роль играют конкретные статистические показатели, при измерении которых можно оценить степень тесноты связи между параметрами [2].

$$R_m(Q_1, Q_2, \ldots, Q_m) = \varphi [R_j(Y_1, Y_2, \ldots, Y_j)], \quad (1)$$

где R_m – параметры качества поверхностного слоя; R_j – параметры режимов лазерного гравирования; Q_1, Q_2,…, Q_m – виды параметров качества поверхностного слоя; Y_1, Y_2,…, Y_j – уровни режимов лазерного гравирования; m – количество параметров качества поверхностного слоя; j – количество уровней режимов лазерного гравирования; φ – функция, связывающая физические параметры лазера, определяющие воздействие квантовой энергии на материал, основными из которых являются длина генерируемой волны, плотность потока энергии, время воздействия, угол падения лазерного луча, и показатели качества поверхностного слоя при лазерной обработке, такие как шероховатость обрабатываемой поверхности и состояние материала поверхностного слоя.

С использованием выражений, приведенных в [3], описывающих взаимодействие лазерного излучения с материалом, для определения температуры в материале при одинаковых и фиксированных расстояниях от центра нагреваемого пятна и глубины нагрева, отсчитываемой от поверхности, вычисление интеграла, в подынтегральное выражение которого входит показательная функция, используя для интегрирования способ сведения с помощью замены переменной к интегралу, содержащему степенную и алгебраическую функции, дает

$$T(t) = \frac{F_0 d}{K\pi^{1/2}} ctg \left(\frac{4\chi t}{d^2}\right)^{1/2} \quad (2)$$

В результате разложения тригонометрической функции $\mathrm{ctg}(x)$ в ряд и использования трех первых членов ряда, что вносит погрешность менее 5 %, но существенно упрощает вычисления, получено:

$$T(t) = \frac{F_0 d}{K\pi^{1/2}} \left[\left(\frac{4\chi t}{d^2}\right)^{1/2} - \frac{\left(\frac{4\chi t}{d^2}\right)^{3/2}}{3} + \frac{\left(\frac{4\chi t}{d^2}\right)^{5/2}}{5} \right] \quad (3)$$

Используя соотношение для описания зависимости между основными параметрами излучения и материала [4], получено выражение для определения глубины проникновения излучения в материал:

$$h = \frac{4P}{C_p \rho T \pi d^2}, \quad (4)$$

где P – мощность излучения, Вт; C_p – теплоемкость материала, Дж/К; ρ – плотность материала, кг/м^3; h – глубина проникновения излучения в материал, м; d – диаметр лазерного луча на поверхности материала, м; $T(t)$ – изменение температуры материала при нагреве, К.

Описание эксперимента

Поскольку термические свойства материалов нелинейно изменяются с изменением температуры, для проверки корректности применения выражения для расчета глубины проникновения лазерного излучения в материал экспериментально воспроизводился полутоновой клин от белого до черного поля.

Для выбора длины волны лазерного излучения использована зависимость светопроницаемости от длины волны. Определение этой функциональной зависимости проведено на основании полученных и приведенных в литературе статистических данных. Для исследования использованы спектры оптического поглощения срезов древесины, ИК-спектры срезов древесины толщиной 0,12 ± 0,04 мм, записанных в диапазоне от 4000 до 400 см$^{-1}$ при спектральном разрешении 4 см$^{-1}$ и числе сканов 50 относительно воздуха [5].

Наиболее оптимальным для рассматриваемого случая является использование CO_2-лазера (лина волны излучения 10,6 мкм), управляемого компьютером. Для гравирования выбран лазерный гравер серии Speedy фирмы Trotec (Австрия) с использованием программных продуктов CORELDRAW, JOBCONTROL. Мощность лазерного излучения изменялась от 0 до 9,6 Вт с шагом 0,64 Вт. Остальные режимы работы лазера были постоянными: скорость лазерного гравирования 18 см/сек, разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм.

Результаты и их обсуждение

Полученные аналитические выражения не противоречат результатам имитационного моделирования и результатам эксперимента. Согласованность теоретических и статистических результатов проверена с использованием критерия согласия, «критерия χ^2» Пирсона.

Проведенные исследования показали, что для оценки качества поверхностного слоя материалов с обугливанием можно использовать следующие параметры: глубину проникновения излучения в материал, среднее значение микронеровностей, среднее квадратическое отклонение микронеровностей и коэффициент корреляции микронеровностей при изменении мощности лазерного излучения. Для получения качественного поверхностного слоя с четким и контрастным изобра-

жением, максимальным сохранением уникального естественного рисунка, компенсирующим имеющиеся естественные неоднородности поверхности, универсальности технологических режимов для материалов с обугливанием поверхности с любым спектром пропускания и поглощения, повышения потребительских свойств художественно-промышленных изделий, необходимо использовать рекомендованные режимы работы лазерной установки при наибольшей допустимой мощности излучения и скорости гравирования.

Выводы

Практическая значимость работы определяется полученными теоретическими и экспериментальными предложениями, применимыми к решению актуальных задач создания художественно-промышленных изделий с учетом химических и физико-механических особенностей материалов, позволяющих подчеркнуть их природную уникальность и компенсировать неоднородность их свойств.

Список литературы

1. Гравирование растровых изображений на обугливаемых материалах лазером / М. М. Черных, А. Э. Дрюкова, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев, А. И. Степанова, А. Д Ардашева // Дизайн. Материалы. Технология. – 2015. – № 4 (39). – С. 74–77.

2. *Алексеев, В. А*. Исследование качества поверхности промышленных изделий из древесины при гравировании лазером / В. А. Алексеев, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 4. – С. 48–53.

3. *Григорьянц, А. Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.

4. *Алексеев, В. А.* Управление лазерным технологическим процессом обработки биоматериалов / В. А. Алексеев, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 19–23.

5. Спектрометрическое устройство для идентификации пород древесины / Е. А. Колгин, А. А. Ухов, А. А. Воронин, А. А. Кострюков, В. С. Черноглазов, А. В. Савушкин // Петербургский журнал электроники. – 2008. – № 2-3. – С. 116–120.

A. V. Usoltseva, applicant
E-mail: ajieksa_oo@mail.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Research of a Surface of the Charred Materials at Laser Processing

The conducted researches have shown that depth of penetration of radiation into material, average value of microroughnesses, an average quadratic deviation of microroughnesses and coefficient of correlation of microroughnesses at change of power of laser radiation is enough for assessment of quality of a blanket of materials with carbonization. For receiving a qualitative blanket with the accurate and contrast image for materials with carbonization of a surface with any range of transmission and absorption, it is necessary to use the recommended operating modes of the laser machine at the largest admissible power of radiation and speed of engraving.

Keywords: Technological process, industrial products, the charred materials, laser processing, the laser equipment, quality of a surface.

УДК 681.785; 615.47

С. И. Юран, д-р техн. наук, проф.
E-mail: yuran-49@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова
А. Ю. Татарских, инженер
МУП «ИжГорЭлектроТранс»

Мобильный фотоплетизмограф

Описан мобильный фотоплетизмограф, позволяющий оперативно регистрировать пульсовые кривые человека и животных. Использование в оптоэлектронных датчиках кроме инфракрасного зеленого спектра излучения снижает влияние артефактов движения на регистрируемый пульсовый сигнал, а также дает возможность получать фотоплетизмограммы с большим отношением сигнал/помеха, что позволяет повысить качество и, в конечном счете, достоверность регистрируемых пульсовых кривых.

Ключевые слова: артефакты, оптоэлектронный датчик, работающий в зеленой области спектра, фотоплетизмография.

© Юран С. И., Татарских А. Ю., 2018

Введение

Одним из методов, позволяющих объективно оценить состояние сосудистой системы, является метод фотоплетизмографии, основанный на регистрации пульсовых кривых, параметры которых связаны с гемодинамическими показателями организма. Для регистрации фотоплетизмограмм, подлежащих исследованию, разработан фотоплетизмограф [1, 2]. При разработке большое внимание уделялось мобильности устройства, позволяющей оперативно регистрировать пульсовую кривую в автономном режиме.

Описание фотоплетизмографа

Структурная схема фотоплетизмографа приведена на рис. 1.

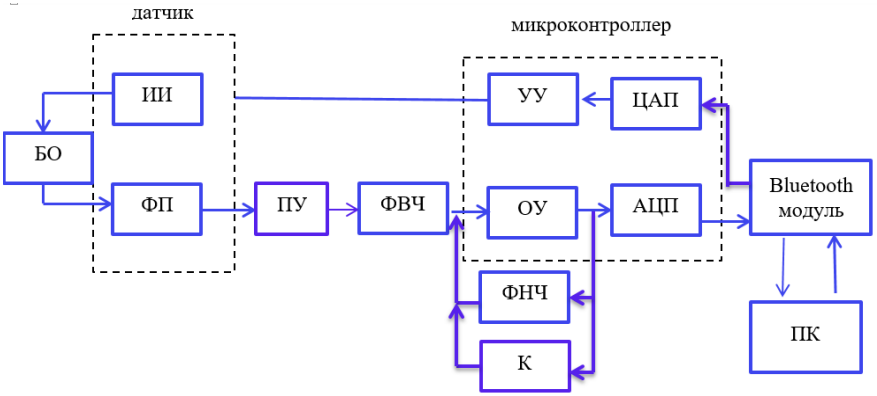


Рис. 1. Структурная схема фотоплетизмографа: БО – биологический объект; ИИ – источник излучения; ФП – фотоприемник; ПУ – предварительный усилитель; ФВЧ – фильтр верхних частот; УУ – устройство управления; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ОУ – операционный усилитель; ФНЧ – фильтр нижних частот; К – резистор в цепи обратной связи ОУ, определяющий коэффициент усиления; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; Bluetooth-модуль – модуль радиосвязи HC-05 стандарта Bluetooth; ПК – персональный компьютер

Рассмотрим принцип действия устройства. С персонального компьютера ПК по каналу радиосвязи стандарта Bluetooth на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) приходит команда на включение устройства. Обработав команду, ЦАП подает сигнал на устройство управления (УУ). Устройство управления формирует и подает напряжение на источник излучения (ИИ), который входит в состав оптоэлектронного датчика. Оптическое излучение, прошедшее сквозь ткани биологического объекта (БО) или рассеянное от нее, отображает

количественную и качественную динамику последовательных изменений объема крови в изучаемом участке ткани в период каждого сердечного цикла. Это излучение поступает на фотоприемник (ФП) датчика. Полученный фототок усиливается предварительным усилителем (ПУ) (преобразователь ток – напряжение) и преобразуется в напряжение.

С выхода ПУ сигнал поступает на фильтр верхних частот (ФВЧ), а затем на вход операционного усилителя (ОУ). В обратную связь ОУ включен фильтр нижних частот (ФНЧ) и резистор, определяющий коэффициент усиления К. С выхода ОУ сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее передается на ПК через Bluetooth-радиосвязь.

Для повышения мобильности устройства измерения пульсовой кривой использовался миниатюрный микроконтроллер в корпусе TSSOP и модуль радиосвязи HC-05 стандарта Bluetooth.

Основным элементом устройства является микроконтроллер PIC16F1705, содержащий в том числе операционный усилитель, десятиразрядный АЦП, ЦАП, последовательный порт интерфейса стандарта RS-232 и др.

Для снижения энергопотребления светодиод подключается к выходу ЦАП, который работает только в момент выборки данных АЦП. Питающее напряжение поступает от Li-Ion аккумулятора. Зарядка происходит через разъем мини-USB и схему, реализованную на контроллере заряда MCP73831. Для связи с компьютером или смартфоном используется символьный протокол.

Программное обеспечение микроконтроллера осуществляет управление и передачу данных. С целью экономии ресурса батареи оптоэлектронный датчик активируется только при запуске измерения. После прихода команды на начало измерения на выходе ЦАП устанавливается напряжение около 3,3 В и подключается измерительный канал. Измерение входного сигнала происходит по прерыванию от внутреннего таймера-счетчика микроконтроллера. Частота дискретизации составляет 200 Гц.

Разработанный фотоплетизмограф, работающий в автономном режиме, с оптоэлектронным датчиком и регистратором пульсовой кривой, в качестве которого использовался смартфон, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Регистрация фотоплетизмограмм на смартфон с помощью датчика, работающего в зеленой области спектра

Фрагмент фотоплетизмограммы, записанной с помощью разработанного устройства с дистальной фаланги пальца кисти, представлен на рис. 3.

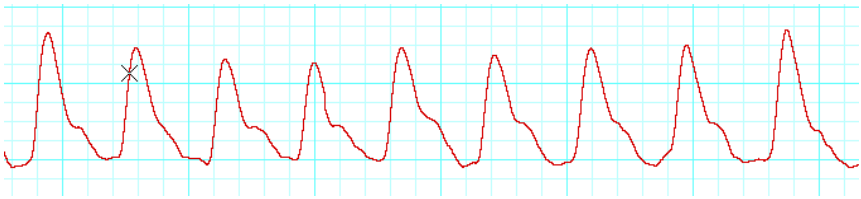


Рис. 3. Фрагмент зарегистрированной фотоплетизмограммы

Одна из конструкций разработанного оптоэлектронного датчика, работающего на обратное рассеяние оптического излучения, представлена на рис. 4.

Металлический корпус датчика, выполненный из латуни, позволяет эффективно экранировать внешние помехи. Подключение датчика к схеме усилителя осуществляется с помощью кабеля, экран которого соединен с корпусом датчика. Для удобства использования датчика его лицевая поверхность выполнена вогнутой.

В разработанных оптоэлектронных датчиках использовались светодиоды зеленого и инфракрасного диапазонов излучения. Длина волны излучения зеленого светодиода составляла $\lambda_з$ = 0,55 мкм, а инфракрасного светодиода $\lambda_{ик}$ = 0,89 мкм. В качестве фотоприемника ис-

пользовались фотодиоды с максимальной чувствительностью в зеленой и инфракрасной областях спектра.

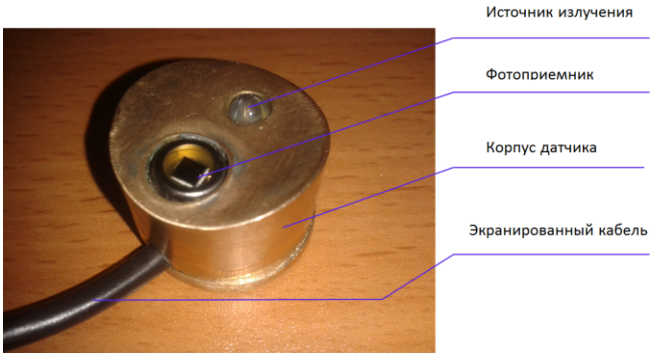


Рис. 4. Общий вид оптоэлектронного датчика

Применение для регистрации фотоплетизмограмм оптоэлектронных датчиков, работающих не только в традиционном для фотоплетизмографии ближнем ИК-диапазоне (0,8–0,9 мкм), но и в зеленом диапазоне (около 0,5 мкм) [3, 4], объясняется большим поглощением зеленой составляющей оптического излучения артериальной кровью поверхностных сосудов кожи.

На рис. 5 приведены спектры поглощения оксигемоглобина (артериальная кровь) и дезоксигемоглобина, или восстановленного гемоглобина (венозная кровь) [5], из которых видно, что поглощение оптического излучения в области длин волн 0,55 мкм намного больше, чем в области 0,81 мкм (точка А). В связи с этим на указанных длинах волн амплитуда пульсового сигнала существенно выше, что ведет к повышению качества регистрируемых фотоплетизмограмм.

Результаты и их обсуждение

Для обоснования возможности получения большей амплитуды пульсового сигнала в зеленой области спектра по сравнению с ИК-диапазоном были проведены следующие эксперименты. Регистрировались фотоплетизмограммы при использовании оптоэлектронных датчиков с зеленым (см. рис. 2) и инфракрасным светодиодами, при этом в качестве фотоприемника использовался фототранзистор типа L-7113P3C с достаточно широким спектральным диапазоном (рис. 6). Из приведенной характеристики видно, что чувствительность фототранзистора на длине волны зеленого спектра составляет 30 %, а ин-

фракрасного в области длин волн 0,89 мкм – практически 100 % от максимальной чувствительности.

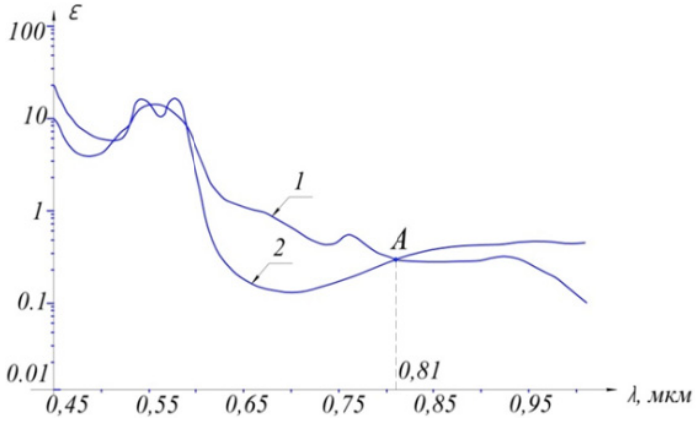


Рис. 5. Спектры поглощения восстановленного гемоглобина *1* и оксигемоглобина *2*, где по оси ординат отложен коэффициент поглощения ε

Полученный в результате исследования сигнал с дистальной фаланги пальца кисти обрабатывался с помощью звуковой карты компьютера и отображался на экране монитора с помощью программы Oscilloscope. На рис. 7 показаны пульсовые кривые, полученные с использованием двух различных источников излучения: зеленого и инфракрасного светодиодов.

Анализируя полученные кривые на рис. 7, можно сделать вывод о том, что поглощение и рассеяние оптического излучения в области длин волн 0,55 мкм намного больше, чем в области 0,89 мкм. Амплитуда сигнала в зеленой области спектра составила около 250 мВ, а в инфракрасной области – около 100 мВ. С учетом того, что чувствительность используемого фототранзистора на длине волны зеленого излучения составляет всего 30 % от максимальной чувствительности, амплитуда сигнала фотоплетизмограммы, полученная в зеленой области спектра, приблизительно в 8 раз выше, чем в инфракрасной области спектра.

Это дает возможность получать фотоплетизмограммы с большим отношением сигнал/помеха, соответственно, повысить качество и, в конечном счете, достоверность регистрируемых пульсовых кривых.

Кроме этого при использовании зеленого спектра излучения снижается влияние артефактов движения на регистрируемый пульсовый сигнал. Известно, что при регистрации фотоплетизмограмм сигнал с оптоэлектронного датчика имеет две составляющие: постоянную (DC), обусловленную поглощением и рассеянием оптического излучения в биоткани, и переменную (AC), обусловленную деятельностью сердца. Постоянная составляющая зависит от глубины проникновения оптического излучения заданной длины волны в биоткань и практически не меняется.

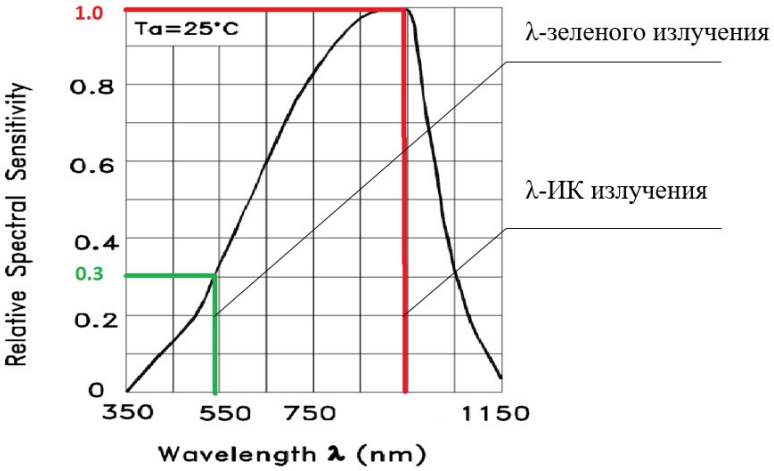


Рис. 6. Спектральная характеристика фототранзистора L-7113P3C

При использовании датчика с зеленым светодиодом амплитуда сигнала DC на выходе датчика будет меньше, т. к. зеленый свет проникает в ткань на меньшую глубину. Поэтому воздействие движения ткани при артефакте на сигнал фотоплетизмограммы будет меньше.



Рис. 7. Пульсовые кривые, полученные с использованием:
а – зеленого светодиода; *б* – инфракрасного светодиода

С другой стороны, поскольку коэффициент поглощения зеленого света кровью намного больше, чем в ИК-области спектра, чувствительность датчика к изменению объема крови при работе сердца будет больше. Это означает, что амплитуда полезного сигнала (AC) будет выше. Поэтому при регистрации выходного сигнала с датчика (сумма сигналов DC и AC) в зеленой области спектра влияние артефактов, которые появляются за счет движения биоткани, уменьшается за счет повышения отношения сигнал/помеха.

Выводы

Описанный фотоплетизмограф позволяет оперативно регистрировать пульсовые кривые человека и животных в различных условиях, в том числе полевых. Использование в датчиках зеленого спектра излучения снижает влияние артефактов движения на регистрируемый пульсовый сигнал, а также дает возможность получать фотоплетизмограммы с большим отношением сигнал/помеха и, соответственно, повысить качество и достоверность регистрируемых пульсовых кривых. С практической точки зрения ближний инфракрасный диапазон целесообразно использовать для исследования кровотока в глубоких тканях (например, в мышцах), а зеленый свет – для поверхностного кровотока в коже.

Список литературы

1. Пульсометр с Bluetooth или устройство фотоплетизмографа [Электронный ресурс] // Хабрахабр. – URL: https://habrahabr.ru/post/258115/ (дата обращения: 21.01.2018).

2. *Алексеев, В. А.* Автоматизированный фотоплетизмограф / В. А. Алексеев, С. А. Ардашев, С. И. Юран // Приборы и методы измерений. – Минск : БНТУ, 2013. – № 1 (6). – С. 46–51.

3. *Maeda, Y.* The Advantages of Wearable Green Reflected Photoplethysmography / Y. Maeda, M. Sekine, T. Tamura // Journal of Medical Systems Volume. – 2011. Vol. 35, № 5. – Pp. 829–834.

4. *Tamura, T.* Wearable Photoplethysmographic Sensors – Past and Present / T. Tamura, Y. Maeda, M. Sekine, M. Yoshida // Electronics. – 2014. – № 3. – Pp. 282–302.

5. *Стерлин, Ю. Г.* Специфические проблемы разработки пульсовых оксиметров // Медицинская техника. – 1993. – № 6. – С. 26–30.

S. I. Yuran, DCs in engineering, professor
E-mail: yuran-49@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia
A. Yu. Tatarskikh, engineer
MUE "IzhGorElectroTrans", Izhevsk, Russia

Mobile Photoplethysmograph

Described mobile photoplethysmograph, allowing to record the pulse curves of humans and animals. The use in optoelectronic sensors besides infrared green spectrum of radiation reduces the effect of motion artifacts on the recorded pulse signal and also gives the opportunity to obtain photoplethysmogram with a large ratio of signal/noise, which improves quality and, ultimately, the accuracy of the recorded pulse curves.

Keywords: artifacts, the optoelectronic sensor, operating in the green region of the spectrum, photoplethysmography.

Секция 6. **Алгоритмы и программные системы для приборостроения**

УДК 681.532

И. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф.
E-mail: iva140742@gmail.com
Е. М. Федоров, аспирант
E-mail: evgeniy.m.fedorov@gmail.com
С. Н. Волосков, магистрант
E-mail: svolosckov@yandex.ru
Ижевский государственный технический университет
имени М. Т. Калашникова

Моделирование многослойных пакетных пьезоактуаторов

В статье приведены результаты математического моделирования цилиндрических пьезоэлектрических преобразователей пакетного типа в среде Matlab Simulink. Рассмотрены варианты пьезоактуаторов, в частности с изменяющимся количеством пьезодисков и внешними параметрами системы. Приведены переходные характеристики и временные диаграммы в зависимости от длины преобразователей, величины постоянного и переменного напряжения, подаваемого на пьезоактуатор.

Ключевые слова: пьезоактуатор, мехатроника, система управления, математическая модель, пьезокерамика.

Введение

Пакетная конструкция [2] представляет собой набор дисковых пьезоэлементов отечественного производства с металлизированными контактами, число пьезодисков в пакете может находиться в пределах от 5 до 1200 шт., что определяется требуемым диапазоном перемещений и габаритами пьезоэлементов [3].

© Абрамов И. В., Федоров Е. М., Волосков С. Н., 2018

К основным характеристикам пакетных актуаторов относится следующее:

– перемещение актуатора может изменяться от единиц до 300 мкм;

– развиваемая сила достигает 5 кН;

– максимальное значение управляемого напряжения достигает 1000 В.

Для более эффективного использования и расширения функциональных возможностей новой конструкции пьезоактуаторов [1] необходимо экспериментально и теоретически исследовать элементы систем автоматического управления, а также провести математическое моделирование пьезоприводов на их основе.

Теоретические основы моделирования

Целью моделирования является определение закономерностей влияния входных параметров (число пьезодисков, напряжение питания, частота, преднагрузка) на выходные параметры пьезопреобразователя.

Моделирование проводилось на основе технических характеристик пьезокерамики ЦТС-19М (Таблица 1). В конечном итоге пьезопреобразователь необходимого размера набирается из дисков пьезокерамики [5].

Таблица 1. **Характеристики материала ЦТС-19М**

Наименование	Обозначение	ЦТС-19М
Пьезоэлектрический модуль, Кл/ Н	d_{33}	$4100*10^{-12}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon^{T}_{33}/\varepsilon_0$	1850
Коэффициент Пуассона	σ_P	0,36
Модуль Юнга, Н/м2	Y_{33}	$5,8*10^{10}$
Коэффициент электромеханической связи	k_{33}	0,72
Плотность, кг/м3	ρ	7600
Внутреннее сопротивление, Ом	$R_{ВН}$	100

На рис. 1 представлена широко используемая модель пьезоэлектрических исполнительных устройств пакетного типа. Данную модель актуатора можно рассматривать как некое реальное приближение [4].

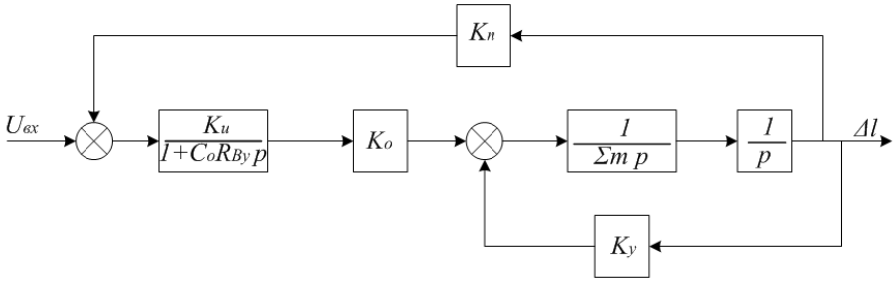


Рис. 3. Модель пьезоэлектрических исполнительных устройств: $U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение K_U – коэффициент передачи устройства управления; C_0 – емкость пьезоактуатора; $R_{\text{ВУ}}$ – выходное сопротивление устройства управления; $K_{\text{П}}$ – коэффициент прямого пьезоэффекта; $K_{\text{У}}$ – коэффициент упругости; $K_{\text{О}}$ – коэффициент обратного пьезоэффекта; Δl – линейное перемещение; $\sum m$– эффективная масса

Численные значения параметров модели актуатора определены с учетом размеров самого актуатора, а также характеристик пьезокерамики ЦТС-19М (табл. 1).

Численные методы определяются следующими формулами:

– коэффициент упругости $K_{\text{у}}$:

$$K_{\text{у}} = \frac{S_0 Y_{33}}{N l_3}, \tag{1}$$

где S_0 – площадь поверхности пьезодиска; N – количество дисков; l_3 – толщина пьезодиска.

– коэффициенты обратного и прямого пьезоэффекта $K_{\text{о}}$ и K_n:

$$K_{\text{о}} = K_n = \frac{S_0 Y_{33} d_{33}}{l_3}; \tag{2}$$

– эффективная масса m_{Σ}:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{о}} + 0{,}382m, \tag{3}$$

где $m_{\text{о}} = 0{,}11$ кг – масса присоединенных к актуатору элементов, $m = S_0 l_3 \rho N$ – масса самого пьезоэлемента;

– электростатическая постоянная времени $T_{\text{Э}}$:

$$T_{\text{Э}} = C_{\text{о}} R_{\text{вн}}, \tag{4}$$

где $C_{\text{о}}$ – емкость пьезоактуатора, определяется следующей формулой:

$$C_{\text{о}} = \frac{\varepsilon_{33}\varepsilon_0(1-K_{\text{эм}}^{2_{33}})NS_0}{l_3}, \tag{5}$$

где $K_{\text{эм}}^{2_{33}}$ – коэффициент электромеханической связи, который определяется как

$$K_{\text{эм}}^{2_{33}} = \frac{d_{33}^2 Y_{33}}{\varepsilon_{33}\varepsilon_0}, \tag{6}$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85*10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, ε_{33} – диэлектрическая проницаемость вдоль третьей оси.

В результате, используя формулы (1)–(6), рассчитаны параметры пьезоактуатора и занесены в табл. 2.

Таблица 2. **Расчетные параметры пьезоактуаторов**

Параметры	Величина	1	2	3	4
Длина	м	0,03	0,06	0,09	0,12
Количество пьезодисков	шт.	42	83	125	166
Емкость электрическая	$*10^{-6}$ Ф	0,04	0,09	0,13	0,17
Коэффициент упругости	$*10^{6}$ Н/м	219	109	72	54
Коэффициенты обратного и прямого пьезоэффекта	Кл/м	3,73	3,73	3,73	3,73
Электростатическая постоянная времени	$*10^{-6}$ с	4,33	8,66	13,00	17,30
Эффективная масса	1/кг	8,06	7,46	6,94	6,49

Моделирование пьезоактуаторов при постоянном входном напряжении

С использованием программной среды Matlab Simulink реализовали математическое моделирование пьезоактуаторов. Одна из полученных математических моделей представлена на рис. 2.

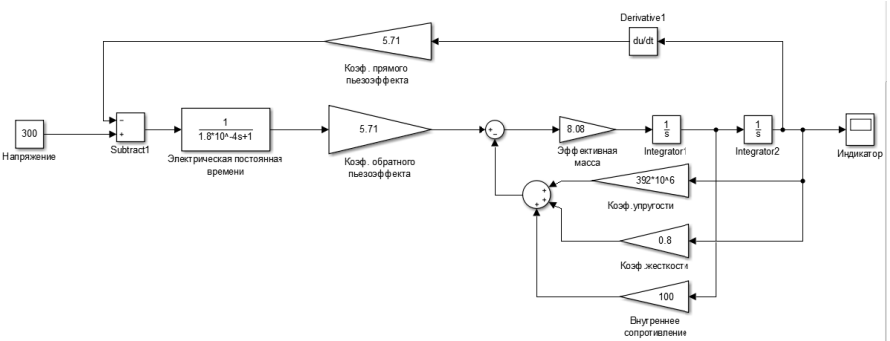


Рис. 4. Математическая модель пьезоактуатора в Matlab Simulink

Моделирование производили для разных напряжений питания и для разных длин пьезоактуаторов. В результате были получены переходные характеристики многослойных актуаторов. На рис. 3 представлены графики переходных характеристик при 100 В и 400 В.

Определили значения зависимости перемещения Δl от длины пьезоактуатора L при разных входных напряжениях. В результате получили следующие графики (рис. 4).

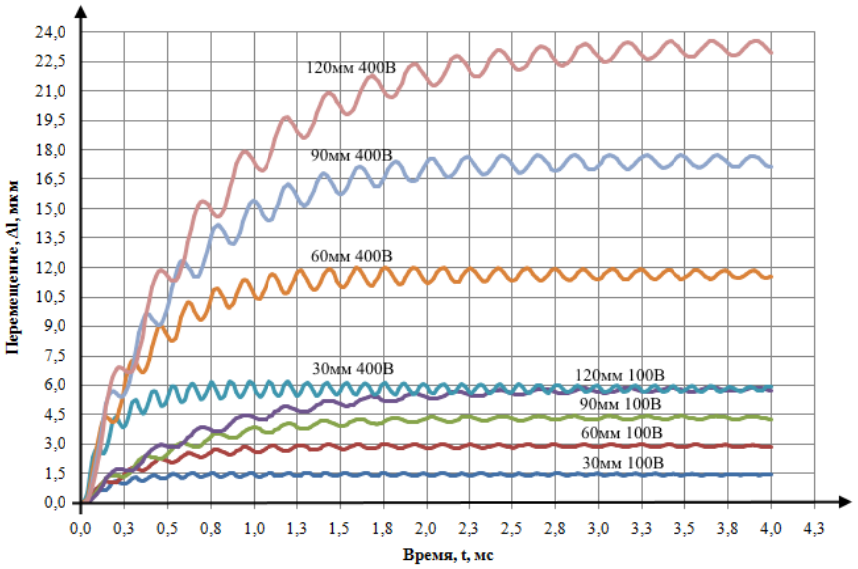


Рис. 5. Переходные характеристики актуаторов при напряжении 100 В и 400 В

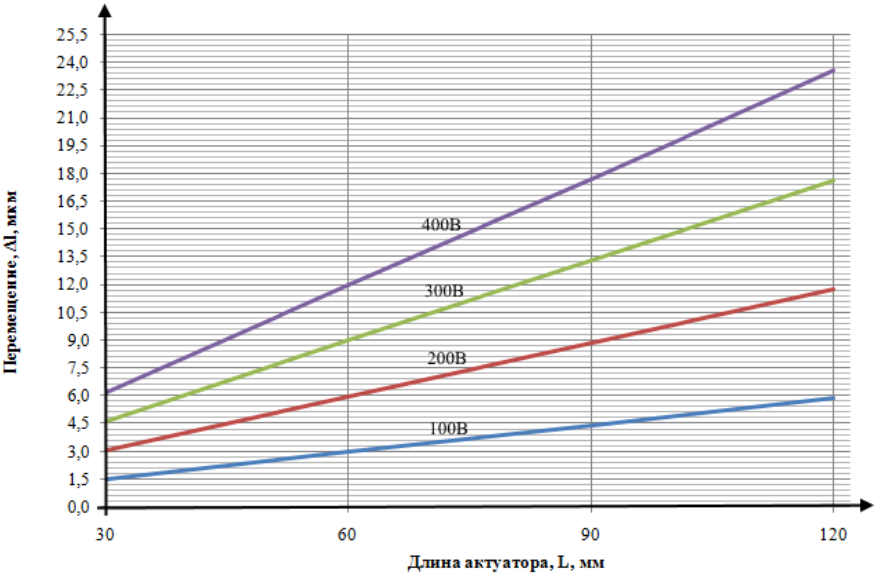


Рис. 6. Графики зависимости перемещения Δl от длины пьезоактуатора L при разном входном напряжении

Из полученных графиков видно:

1. Графики переходных характеристик несут нелинейный характер.

2. С увеличением длины актуатора увеличивается время реакции на поданное напряжение, т. е. время, за которое актуатор увеличивается на Δl.

3. При увеличении напряжения питания происходит увеличение деформации Δl.

Моделирование пьезопривода при изменении частоты входного питания

Как видно из предыдущих методов, моделирование производилось при постоянном напряжении питания в интервале от 100 до 400 В с шагом 100 В. Данный вид моделирования характеризуется переменным питающим напряжением с тем же шагом, но при изменении частоты следования импульсов от 50 до 800 Гц (50, 100, 200, 400, 800).

Выбранные значения частоты определяются из характеристики работы пьезоактуаторов, т. е. дорезонансным режимом работы.

В связи с этим произведем расчет собственной частоты пьезоэлемента по формуле

$$f = \frac{1{,}58}{L}\sqrt{\frac{Y_{33}}{\rho}}, \qquad (7)$$

где L – длина пьезоактуатора; Y_{33} – модуль Юнга по оси 3; ρ – плотность материала.

Расчеты произвели для разных длин пьезоактуаторов и получили следующие результаты (Таблица 3).

Таблица 3. **Расчетные параметры частот пьезоактуаторов**

Длина, м	0,03	0,06	0,09	0,12
Собственная частота, кГц	145	73	48	36

Видим, что получившиеся значения частот намного выше, чем выбранные значения. Далее произвели моделирование всех возможных вариантов изменения напряжения и выбранных частот. Для наглядности представили графики переходных характеристик при напряжении питания 100 В и частотах 50 Гц и 800 Гц:

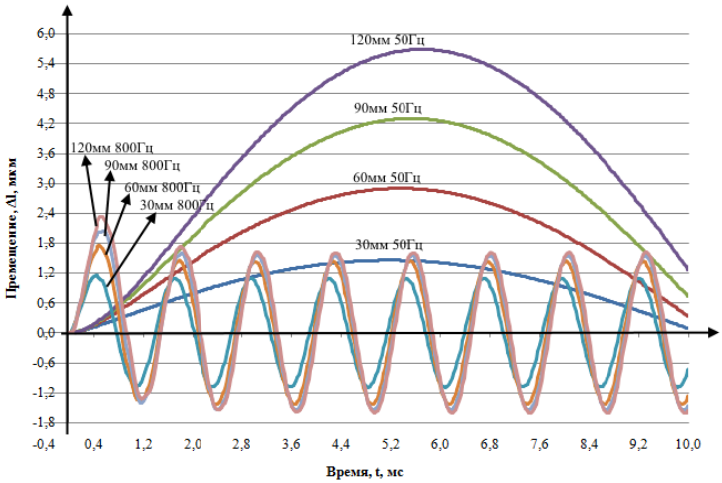


Рис. 7. Переходные характеристики актуаторов при частоте 50 Гц и 800 Гц

При постоянном напряжении определили значения зависимости перемещения Δl от длины пьезоактуатора L при разных входных напряжениях. Полученные значения представили при частотах питаю-

щего напряжения сети 50 Гц и 800 Гц. В результате получили следующие графики (рис. 6).

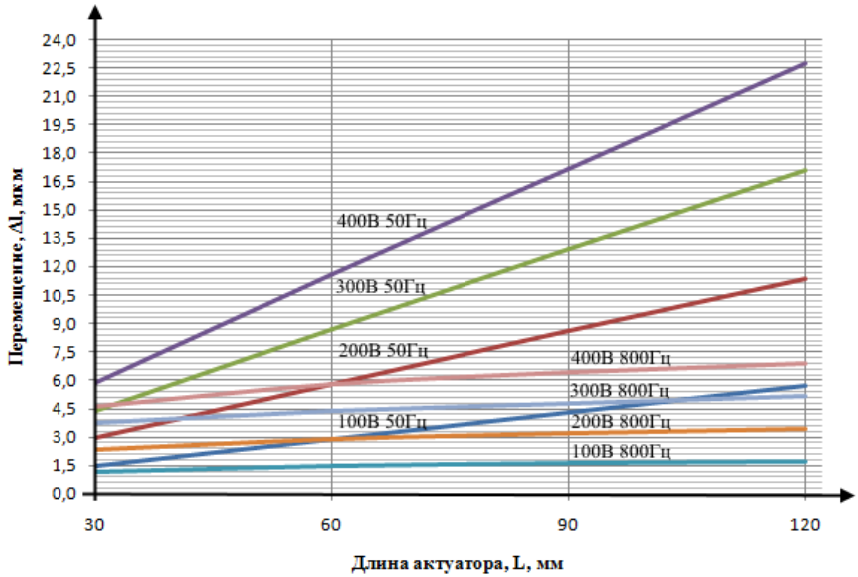


Рис. 8. Графики зависимости перемещения Δl от длины пьезоактуатора L при разном входном переменном напряжении

Проанализировав полученные графики, можно видеть следующее:

1. Величины деформаций при постоянном и переменном напряжении при частоте 50 Гц существенно не отличаются друг от друга, что наглядно представлено на рис. 4 и 6;

2. С увеличением частоты питающего напряжения происходит уменьшение величины перемещения, что можно увидеть на рис. 6.

Выводы

Анализ зависимостей показал, что данная математическая модель пьезоактуатора с высокой степенью отражает процессы, происходящие в актуаторе.

Используя данную модель, определили выходные характеристики пьезоактуаторов в зависимости от входных параметров (количества пьезодисков, напряжения, предварительной нагрузки, частоты). Из полученных зависимостей можно определить оптимальное соотноше-

ние размеров актуатора к необходимым выходным параметрам, в нашем случае перемещению.

Список литературы

1. *Абрамов, А. И.* Моделирование мехатронного пьезомодуля для сборки конических керамических соединений с натягом / А. И. Абрамов, И. В. Абрамов, Е. М. Федоров // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2017. – № 3. – С. 43–47.

2. Разработка и исследование пьезопривода на основе многослойных тонкопленочных пьезоактуаторов / А. А. Бобцов, В. И. Бойков, С. В. Быстров, В. В. Григорьев // Управление и информационные технологии : сб. докл. 5-й науч. конф. (УИТ-2008). – 2008. – Т. 2. – С. 172–176.

3. Пьезокерамические материалы и элементы [Электронный ресурс] // Каталог продукции ОАО «НИИ «Элпа». – URL: http://www.elpapiezo.ru/materials.html (дата обращения: 02.10.2017).

4. Пьезокерамические пакетные и моноблочные актуаторы / А. Сафронов, В. Климашин, Б. Парфенов, В. Ярошевич, В. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2002. – № 6. – С. 1–4.

5. *Федоров, Е. М.* Пьезомодуль для сборки конических керамических соединений с натягом // Закономерности и тенденции развития науки в современном обществе : сб. статей междунар. науч. практ. конф., 05 дек. 2015 г., г. Уфа. В 5 ч. Ч. 3. – Уфа : Аэтерна, 2015. – С. 87–89.

I. V. Abramov, DSc in engineering, professor
E-mail: iva140742@gmail.com
E. M. Fedorov, postgraduate student
E-mail: evgeniy.m.fedorov@gmail.com
S. N. Voloskov, magister student
E-mail: svolosckov@yandex.ru
Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia

Modelling of Multilayered Package Piezoactuators

In the article the results of mathematical modeling of cylindrical piezoelectric transducers batch-type in Matlab Simulink. Discussed options of piezoactuators in particular the number of piezo disks and external parameters of the system. Given transient characteristics timing diagrams depending on the length of the converters, the magnitude AC and DC voltage supplied to piezoactuator.

Keywords: piezoactuator, mechatronics, control system, mathematic model, piezoceramics.

УДК 539.261

С. М. Мокрова, мл. науч. сотр.
В. Н. Милич, канд. техн. наук, зав. отделом
E-mail*:* lssm@ftiudm.ru
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Алгоритм выбора достоверных ориентаций при расшифровке данных рентгенодифракционного анализа

В статье рассматривается задача анализа текстуры по прямой полюсной фигуре (ППФ) как задача распределения объема ППФ между различными ориентациями. Подробно рассмотрен один из главных этапов метода – выбор достоверных ориентаций, позволяющий сформировать основные текстурные компоненты. Для проверки результатов работы алгоритма вычисляются значения RP-фактора.

Ключевые слова: анализ текстуры поликристалла, дискретная модель ППФ, показатель достоверности ориентации, тектурные компоненты, RP-фактор.

Введение

В связи с широким использованием поликристаллических материалов, задача анализа их текстуры имеет значительный практический интерес. Для того чтобы описать текстуру материала, необходимо получить информацию об объеме кристаллитов (зерен) отдельных текстурных компонент и их пространственном положении – ориентации. Эта информация может быть получена из прямых полюсных фигур (ППФ). На ППФ отображаются интенсивности отраженного рентгеновского луча от кристаллографических плоскостей кристаллитов, удовлетворяющих условию Вульфа – Брегга, как функция полярного и азимутального углов (рис. 1) [1].

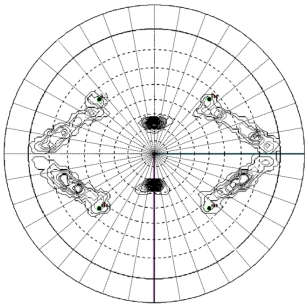


Рис. 1. Полюсная фигура {111} с подложенной сеткой Болдырева

В работе для представления ППФ используется дискретная мо-

© Мокрова С. М., Милич В. Н., 2018

дель – сетка Болдырева с шагом 1° (что обеспечивает более точное представление исходных данных), в которой каждому узлу ставится в соответствие значение интенсивности, определяемое по исходной ППФ. Кроме того, выполняется квантование значений интенсивности. После операций дискретизации и квантования ППФ можно представить в виде объемной 3D-модели. В работе [2] описан предложенный авторами алгоритм определения списка возможных ориентаций в поликристалле. Задача анализа текстуры по ППФ состоит в том, чтобы распределить объем ППФ между различными ориентациями, по ним получить текстурные компоненты и определить их параметры.

Для описания алгоритма анализа текстуры воспользуемся следующим наглядным изображением (рис. 2, *а*). Прямоугольная сетка представлена узлами и моделирует полярную сетку Болдырева на ППФ. На эту сетку размещены квадраты, которые иллюстрируют положение ориентаций кристаллитов на ППФ (изображены черным цветом на рис. 2, *а*), а углы квадрата – положение полюсов ориентаций плоскостей отражения семейства {111}.

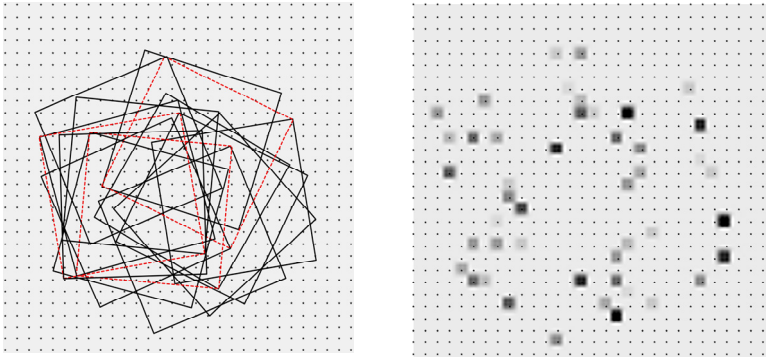


Рис. 2. Пример модельной текстуры на прямоугольной сетке (*а*); модельная полюсная фигура (*б*)

Для каждой ориентации модельного примера задано некоторое значение интенсивности, выраженной целым числом. Для моделирования реальной ситуации распределения ориентаций расположение квадратов на сетке подбирается таким образом, чтобы углы различных ориентаций накладывались друг на друга. Множество квадратов, повернутых на разные углы, представляет некую модельную текстуру.

После расположения всех квадратов каждому узлу сетки приписывается суммарное значение интенсивности I тех ориентаций, для углов которых данный узел является ближайшим. Те узлы, значения интенсивности которых равны нулю, будем называть нулевыми, остальные узлы – ненулевыми. Сетка со значениями интенсивностей (отображаются квадратиками различной яркости) будет являться аналогом дискретной модели ППФ (рис. 2, *б*).

Предложенный алгоритм анализа текстуры по ППФ состоит из нескольких этапов [2]. На первом этапе определяются все такие возможные варианты размещения квадратов на сетке ППФ, когда узлы, ближайшие к углам квадрата, являются ненулевыми. Найденные ориентации описываются номерами четырех ненулевых узлов, ближайших к углам квадрата (полюсам ориентации). Поскольку шаг сетки значительно меньше стороны квадрата, погрешностью приближения к узлу сетки можно пренебречь. Для каждого узла также подсчитывается количество ориентаций K_g, которым он принадлежит. При такой процедуре могут быть найдены и такие ориентации, которых не было в исходных данных (отображены красными квадратами на рис. 2, *а*). Задача состоит в определении положения изначально заданных в модельном примере квадратов по известным значениям интенсивности узлов сетки. Таким образом, исходными данными являются узлы сетки, для каждого из которых известно два целочисленных параметра: интенсивность и количество ориентаций, относящихся к этому узлу. Для поиска достоверных ориентаций предлагается использовать третий параметр узла, характеризующий вероятность появления рассматриваемой ориентации в узле.

Для некоторого конкретного узла интенсивность может быть распределена между ориентациями несколькими способами. Например, в табл. 1 приведено шесть вариантов распределения интенсивности, равной 2, по трем ориентациям. Из таблицы видно, что для каждой ориентации есть варианты как с нулевой интенсивностью в рассматриваемом узле, так и с ненулевой. Будем считать, что если для некоторой ориентации интенсивность при некотором варианте распределения ориентаций в узле нулевая (строки 1, 2, 3 для ориентации 1), то в этом случае ориентация в образце отсутствует, если интенсивность ненулевая, то присутствует (строки 4, 5, 6 для ориентации 1).

Таблица 1. **Распределение интенсивности по ориентациям в узле**

Вариант распределения	Ориентации		
	1	2	3
1	0	0	2
2	0	2	0
3	0	1	1
4	1	1	0
5	1	0	1
6	2	0	0

В общем случае задача заключается в распределении интенсивности I в узле между K_g возможными ориентациями в этом узле. Это задача комбинаторики о числе сочетаний с повторениями из K_g по I [3]. Количество сочетаний с повторениями возможных вариантов ориентаций $\overline{C}^I_{K_g}$ в узле (общее количество строк в таблице распределения интенсивностей по ориентациям) можно вычислить на основании выражения

$$\overline{C}^I_{K_g} = C^I_{I+K_g-1} = \frac{(I+K_g-1)!}{I!(K_g-1)!}, \tag{1}$$

где I – значение интенсивности в узле, K_g – количество ориентаций. Кроме того, можно вычислить количество вариантов с нулевой интенсивностью в узле для одной из ориентаций (в табл. 1 выделено жирной рамкой). В этом случае количество возможных ориентаций уменьшается на единицу из-за невозможности ориентации 1, а суммарная интенсивность I остается прежней:

$$\overline{C}^I_{K_g-1} = C^I_{I+K_g-2} = \frac{(I+K_g-2)!}{I!(K_g-2)!}. \tag{2}$$

Доля вариантов с отсутствием одной из ориентаций в узле V_0 определяется выражением

$$V_0 = \frac{\overline{C}^I_{K_g-1}}{\overline{C}^I_{K_g}}. \tag{3}$$

После подстановки (1) и (2) в (3) получаем величину доли вариантов с отсутствием одной из ориентаций в узле:

$$V_0 = \frac{K_g - 1}{I + K_g - 1}.$$

Доля вариантов с единственной ориентацией в узле, имеющей ненулевое значение интенсивности во всех этих вариантах и, следовательно, являющейся наиболее предпочтительной из всех других ориентаций в этих вариантах:

$$V_1 = 1 - V_0 = \frac{I}{I + K_g - 1}. \quad (4)$$

Выражение (4) используется для вычисления параметра узла, который характеризует долю вариантов, включающих рассматриваемую ориентацию. Из выражения (4) видно, что чем выше значение интенсивности узла, тем значение параметра выше. Чем меньше K_g, тем большее значение этот узел вносит в значение показателя достоверности ориентации.

Показатель достоверности ориентации вычисляется из значений параметров узлов сетки, относящихся к полюсам выбранной ориентации, и определяется выражением, полученным эмпирическим путем,

$$V_g = 0.7 * \max(V_1^j) + 0.3 * {}^{1}\!/\!_{n} \sum_n V_1^j \quad (5)$$

где V_g – показатель достоверности ориентации g; V_l^j– параметр узла сетки, определяющий j-й полюс ориентации g; n – количество полюсов ориентации g. Если параметр какого-либо полюса ориентации равен 100 %, то такая ориентация должна однозначно присутствовать в образце.

Выбор достоверных ориентаций производится после их сортировки по убыванию значений показателя достоверности. Таким образом, в первую очередь рассматриваются ориентации, которые минимально пересекаются с другими ориентациями и привязаны к узлам, которые имеют наибольшие интенсивности. После выбора наиболее достоверной ориентации из значений интенсивности 3D-модели ППФ (рис. 3), соответствующих полюсам выбранной ориентации, вычитается один уровень. Значения показателя достоверности для всех оставшихся ориентаций пересчитываются. Эта процедура повторяется, пока остаются ориентации, у которых все полюса имеют ненулевую интенсивность.

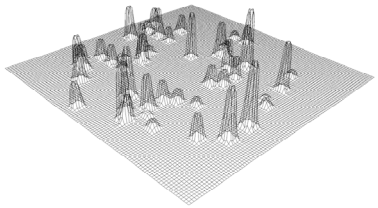


Рис. 3. 3D-модель для приведенной выше модельной текстуры

Работоспособность алгоритма проверялась на модельных примерах. Ниже приведены исходные данные и построенные по ним модельные ППФ для семейств {111} и {200} (рис. 4). В качестве исходных данных взяты три ориентации, заданные углами Эйлера (табл. 2). Ориентации задаются списком в формате [α, β, γ, *I*], где первые три параметра – это углы Эйлера, *I* – значение интенсивности ориентации. ППФ определяется значениями интенсивности узлов сетки, объем ППФ равен сумме интенсивностей полюсов отдельных ориентаций. По приведенным в табл. 2 ориентациям сформированы 3 текстурные компоненты с рассеянием 4°. Значение интенсивности ориентаций внутри компоненты изменяется по нормальному закону. На рис. 4 представлена модельная ППФ, на которой отображены полюса семейств {111} и {200}. Цветом обозначены разные текстурные компоненты из табл. 2. Исходные данные подобраны так, чтобы некоторые полюса {111} накладывались друг на друга. Всего при построении модельной ППФ было сформировано 243 ориентации по 81 на каждую текстурную компоненту в табл. 2.

Таблица 2. **Текстурные компоненты модельной ППФ**

Текстурные компоненты	Углы Эйлера [α,β,γ]			Интенсивность
1	25°	38°	4°	7
2	20°	30°	10°	8
3	12°	45°	3°	5

Анализ модельной ППФ производился для плоскостей отражения {111} с использованием алгоритма с этапами поиска возможных ориентаций и выбора наиболее достоверных. На этапе поиска ориентаций было найдено 4370 ориентаций. После этапа выбора достоверных ориентаций выделено 509 ориентаций. При этом оставшийся неиспользованный объем ППФ составил 4 %.

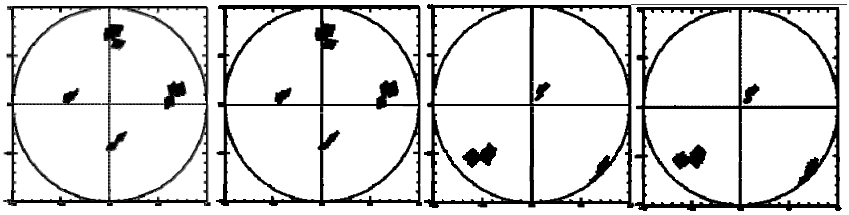
Проверка эффективности разработанного алгоритма осуществлялась путем расчета RP-фактора [4]. Для расчета RP-фактора необходимо восстановить ППФ для плоскостей отражения {111} и {200} по

полученным результатам анализа модельной ППФ. Это возможно, т. к. для каждой найденной ориентации известны углы Эйлера. Поскольку исходные ППФ были дискретизированы с шагом 1°, то при вычислениях возникает погрешность 1° выбора близлежащего узла сетки к полюсам ориентации. Поэтому при вычислении RP-фактора применялся модифицированный алгоритм, в котором для каждого узла в расчет принимается минимальная разность интенсивности исходной ППФ и значений интенсивности в ближней окрестности восстановленной ППФ. Таким образом, модифицированная формула расчета RP-фактора:

$$RP = \frac{1}{n}\sum_{\alpha,\beta}^{n} \min_{i,j}\left(\frac{\left|P^E(y_{\alpha,\beta}) - P^M(y_{i,j})\right|}{P^E(y_{\alpha,\beta})}\right)\cdot 100\% \qquad (6)$$

где $P^E(y_{\alpha,\beta})$ – значения интенсивности экспериментальной ППФ в узле, соответствующем полярным углам [α,β], $P^M(y_{i,j})$ – значения интенсивности узла восстановленной ППФ, где $i \in [\alpha-1, \alpha+1]$, $j \in [\beta-1, \beta+1]$. Сравнение производится только по n ненулевым узлам сетки $\{y_{\alpha,\beta}\}$ экспериментальной ППФ.

Для проверки результатов вычислений по выражению (6) определяется RP-фактор для двух пар ППФ: исходной ППФ {111} и восстановленной ППФ {111}, а также исходной ППФ {200} и восстановленной ППФ {200} (см. рис. 4).



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Исходная ППФ {111} (*а*); восстановленная ППФ {111} (*б*); исходная ППФ {200} (*в*); восстановленная ППФ {200} (*г*)

По изображениям видно, что формы областей ненулевой интенсивности на ППФ практически совпадают. Количественная оценка результата сравнения дается значениями RP-фактора. Из литературы

известно, что при анализе текстуры с использованием ФРО RP-фактор не более 14 % считается удовлетворительным [4]. При сравнении исходной ППФ {111} и восстановленной ППФ {111} RP-фактор равен 1,42 %, что означает практически полное совпадение полюсных фигур. Для восстановленной ППФ семейства {200} области ненулевых значений интенсивности имеют некоторый разброс, но при этом RP-фактор, вычисленный по модифицированной формуле, имеет значение 3,49 %, что существенно лучше удовлетворительного значения 14 %.

Выводы

Предложенные алгоритмы позволяют проводить экспресс-анализ текстуры по одной неполной ППФ. На примерах модельных ППФ описан алгоритм выбора достоверных ориентаций, позволяющий разобрать ППФ на отдельные ориентации. Оценка результатов вычислений с помощью RP-фактора показывает эффективность предложенного алгоритма.

Список литературы

1. *Бородкина, М. М.* Рентгенографический анализ текстуры в металлах и сплавах / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – М. : Металлургия, 1982. – 272 с.

2. *Мокрова, С. М.* Определение структуры поликристаллических материалов с помощью алгоритма объектно-векторного представления плоскостей отражения и визуализация результатов в пространстве Родрига / С. М. Мокрова, Р. П. Петров, В. Н. Милич // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2016. – Т. 26, вып. 3. – С. 336–344.

3. *Виленкин, Н. Я.* Комбинаторика. – М. : Наука, 1969. – 328 с.

4. *Савелова, Т. И.* Методы восстановления функций распределения ориентаций по полюсным фигурам (обзор) / Т. И. Савелова, Т. М. Иванова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М. : Изд-во ТЕСТ-ЗЛ, 2008. – Т. 74, № 7. – С. 25–33.

S. M. Mokrova, junior reseacher
V. N. Milich, CSc in engineering, head of division
E-mail: lssm@ftiudm.ru
Physical-Technical Unstitute UB RAS, Izhevsk, Russia

The Algorithm for the Choosing of Reliable Orientations When Decoding X-Ray Diffraction Data

The textural analysis task using a direct polar figure (DPF) is considered as the task of the distribution of the DPF volume between different orientations. In detail one of the main stages of the method is considered – the choice of reliable orientations allowing to form the basic textural components. The values of the RP-factor are calculated to verify the algorithm.

Keywords: analysis of the polycrystalline texture, discrete model of the DPF, factor of the orientation reliability, textural components, RP-factor.

УДК 528.854:517.4

А. И. Назмутдинова, канд. техн. наук, науч. сотрудник
В. Н. Милич, канд. техн. наук, зав. отделом
Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск

Применение вейвлет-преобразования для интерпретации данных с беспилотного летательного аппарата*

Представлена методика обработки данных, полученных с беспилотного летательного аппрата, для обнаружения областей местности, обладающих определенными отличительными характристиками. Метод основывается на применении вейвлет-преобразования изображений. Исследовано влияние размера окна преобразования, а также уровня преобразования на коэффициент корреляции данных, полученных в результате обработки с данными, принятыми в качестве эталона.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, беспилотные летательные аппараты, вейвлет-преобразование, кратномасштабный анализ, области с характерными свойствами.

© Назмутдинова А. И., Милич В. Н., 2018

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-06-04239а.

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является важным источником данных, применяемых в самых разнообразных прикладных областях [1, 2]. В связи с постоянным совершенствованием съемочных систем все более актуальным становится вопрос разработки новых методов для решения новых практических задач. В представленной работе рассматривается возможность применения данных ДЗЗ для поиска областей местности с характерными свойствами. Под областью местности с характерными свойствами следует понимать территорию, обладающую определенными отличительными признаками. В настоящей работе рассматривается возможность обнаружения областей, на территории которых имеются археологические памятники.

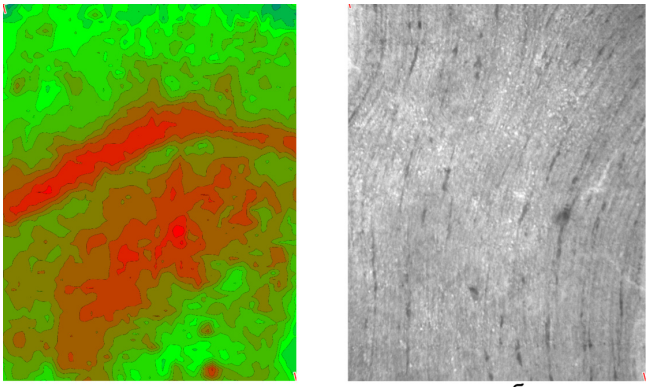
Постановка задачи

Благодаря тому, что почва и растительность в разных состояниях поразному отражают солнечное излучение, представляется возможным по данным ДЗЗ обнаруживать области с характерными свойствами, отличающиеся от окружающей территории. Известно, что изменение характера растительности может служить признаком заглубленных археологических объектов, заполненных гумусированным слоем [3].

Для описания свойств изображений объектов растительности представляется перспективным применение вейвлет-преобразования, которое способно описывать сигнал и в частотной, и в спектральной областях, тем самым обеспечивая более полное представление характеристик исследуемых объектов [4, 5].

Все экспериментальные исследования проводились по данным, полученным для территории одного из памятников в Удмуртии – Кушманского III селища (Ярский район, Удмуртская Республика). На этой территории были проведены геофизические исследования, в результате чего получена карта (рис. 1, *а*), на которой красным цветом выделены участки с большой мощностью гумусированного слоя. Снимок, полученный с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне на ту же территорию, представлен на рис. 1, *б*).

Изображение, представленное на рис. 1, *а*, было принято в качестве эталонной карты. По снимку, представленному на рис. 1, *б*, требуется получить в результате его обработки без использования геофизических методов изображение, высоко коррелирующее с эталонной картой. Кроме того, необходимо провести исследование параметров использованных вейвлет-преобразований.



а *б*

Рис. 1. Результаты геофизических исследований:
а – карта мощности гумусированного слоя; *б* – снимок, полученный с БПЛА

Решение задачи

Была предложена следующая методика обработки исходного изображения. На эталонной карте и снимке с БПЛА проводились линии сканирования таким образом, чтобы охватить всё разнообразие данных, представленных на рис. 1, *а*. Вдоль этих линий для изображения в БИК-диапазоне производился расчет признаков изображения, исследованных ранее в работах авторов и показавших высокую эффективность при классификации объектов лесной растительности [6]. Для их расчета используется двумерное дискретное вейвлет-преобразование (ДВП), результатом одного уровня которого являются четыре изображения ДВП, характеризующие аппроксимацию, горизонтальные, вертикальные и диагональные детали исходного изображения. Следующий уровень ДВП получают путем проведения вейвлет-преобразования над изображением аппроксимации, полученным на предыдущем этапе. Признаки, показавшие наибольшую корреляцию с данными эталонной карты вдоль линий сканирования, отбирались в качестве индикаторов областей местности с характерными свойствами.

Для анализа эффективности предложенной методики исследовались такие параметры, как размер окна ДВП (k) и уровень ДВП (L). В работе рассмотрены вейвлеты Добеши, Шеннона – Котельникова, а также вейвлет Батла – Лемарье. Выбор обусловлен их эффективностью при решении задач классификации и распознавания (см., например [7]), а также тем, что они представляют принципиально разные семейства вейвлет-функций.

Результаты и их обсуждение

Сопоставление полученных результатов с данными эталонной карты производится на основе коэффициента корреляции. Для исследования влияния размера окна ДВП использовалось одноуровневое вейвлет-преобразование Шеннона – Котельникова. Полученные результаты (максимальный коэффициент корреляции, полученный для любого из рассмотренных признаков) для трех базовых линий представлены в табл. 1 (при этом шаг сдвига окна равнялся половине размера окна, т. е. окно размером 8×8 сдвгается с шагом $h = 4$). Стоит отметить, что в качестве размеров окон ДВП подобраны такие размеры, которые являются степенью 2, что требуется для выполнения полного вейвлет-преобразования изображения.

Таблица 1. **Максимальные абсолютные значения коэффициентов корреляции для разных размеров окон ДВП**

	8×8	16×16	32×32	64×64	128×128	256×256	512×512
1 линия	0,27	0,27	0,34	0,40	0,50	0,64	0,73
2 линия	0,26	0,28	0,36	0,43	0,48	0,49	0,48
3 линия	0,21	0,27	0,30	0,32	0,43	0,51	0,67

Согласно таблице, с увеличением размера окна увеличивается и коэффициент корреляции. Однако выглядит несообразным рассматривать окна размером более 256×256, поскольку это может не позволить обнаружить территории, размеры которых полностью помещаются в окно такого размера. Кроме того, высокий коэффициент корреляции для окон ДВП с большим размером может быть вызван сильным прореживанием данных за счет шага h.

Таким образом, наиболее оптимальный размер окна составляет 256×256. Отметим, что справедливость этого вывода подтверждается и результатми экспериментов для других типов вейвлетов. Например, при вычислении вейвлет-преобразования Добеши 2-го порядка и варьировании размеров окон были получены результаты, показанные на рис. 2, из которого видно, что наилучший признак (средние значения изображения аппроксимации) принимает свое максимальное значение при размере окна 256×256.

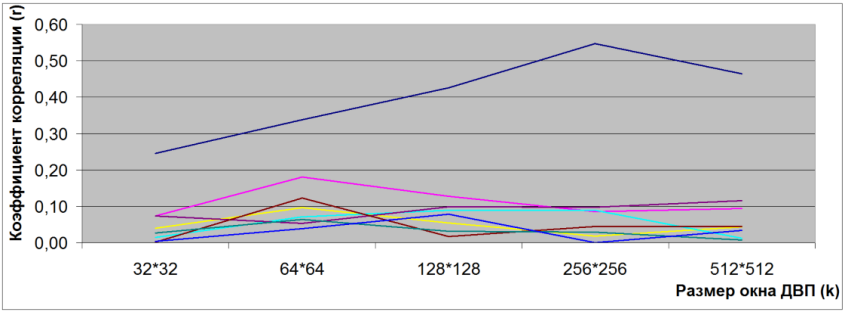


Рис. 2. Поведение коэффициентов корреляции вычисляемых 8 признаков при изменении размера окна ДВП (вейвлет Добеши)

Вейвлет-преобразование позволяет проводить кратномасштабный анализ, который заключается в проведении многоуровневого вейвлет-преобразования. Это может позволить выявить особенности изображений, возникающие на различных масштабах. Поэтому важно определиться с наиболее информативным уровнем вейвлет-преобразования.

На рис. 3, 4 представлены графики значений коэффициентов корреляции признаков, рассчитанных с использованием вейвлета Добеши (рис. 3) и вейвлета Батла – Лемарье (рис. 4), с данными эталонной карты. Характер кривых, полученных для признаков с наибольшей корреляцией, позволяет говорить о наибольшей информативности 2-го и 3-го уровня вейвлет-преобразования.

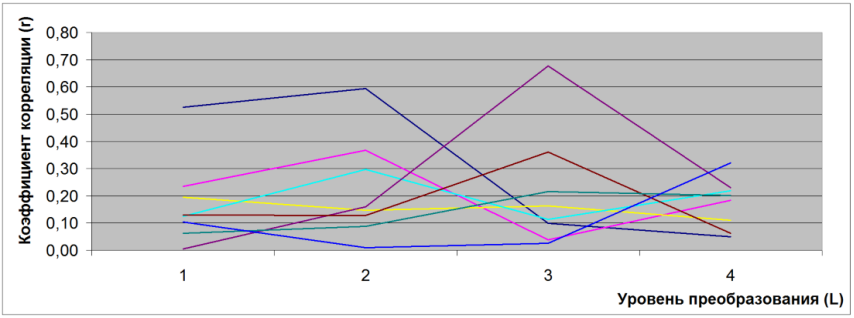


Рис. 3. Корреляции 8 признаков, рассчитанных на основе разных уровней вейвлет-преобразования Добеши 2-го порядка

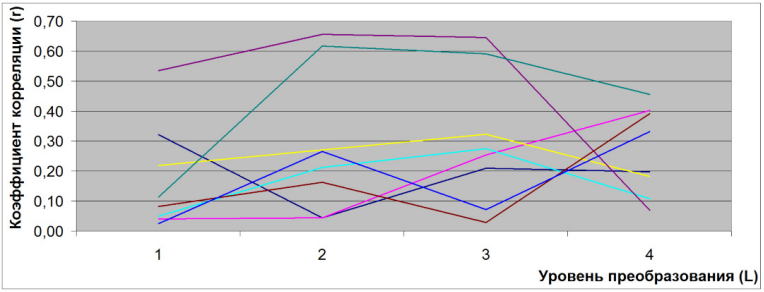


Рис. 4. Корреляции 8 признаков, рассчитанных на основе разных уровней вейвлет-преобразования Батла – Лемарье

Рассмотрим значения признаков, рассчитанных и для более высоких уровней преобразования. На рис. 5 представлены значения признаков, рассчитанных с использованием вейвлет-преобразования Шеннона – Котельникова до 11-го уровня. Очевидно, что начиная с 4-го уровня преобразования значения признаков мало отличаются друг от друга, что также подтверждает целесообразность выбора трехуровневого вейвлет-преобразования.

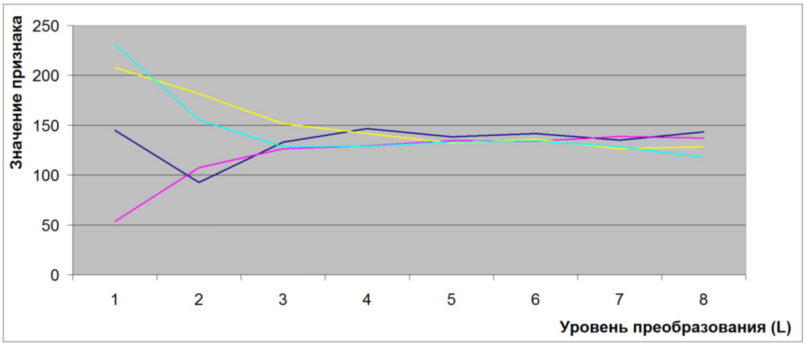


Рис. 5. Значения признаков, рассчитанных на основе разных уровней вейвлет-преобразования Шеннона – Котельникова

Многоуровневое вейвлет-преобразование изображения позволяет выделять не только характерные частоты, но также и масштаб, на котором они возникают. Таким образом, при разработке индикатора области с большой мощностью гумусированного слоя земли имеет смысл использовать комбинацию характеристик, рассчитанных для разных уровней вейвлет-преобразования.

В результате анализа графиков значений признаков для разнообразных участков (с преобладанием гумусированного слоя земли, без гумусированного слоя, а также участков, охватывающих оба типа) было решено в качестве индикатора области использовать значение второй производной признака «среднее значение по изображению аппроксимации». Применение такого индикатора для всего изображения, полученного с БПЛА в БИК-диапазоне путём рассчета его значения в окнах размером 64×64 и сдвига с шагом $h = 16$, позволило получить изображение, представленное на рис. 6, *а*. Визуальное сопоставление полученного изображения с эталонной картой (рис. 6, *б*) позволяет показать возможность выявления двух характерных областей.

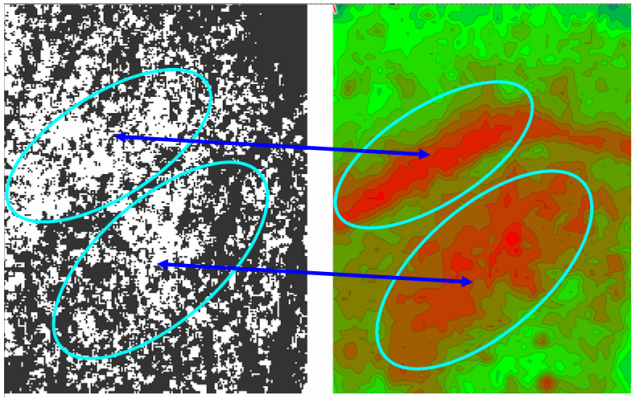


Рис. 6. Сопоставление результатов обработки снимка с БПЛА (*слева*) с эталонной картой (*справа*)

Выводы

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Вейвлет-преобразование изображений ДЗЗ позволяет получать признаки, показывающие довольно высокие значения корреляции (порядка 0,6) с эталонными данными. Поэтому такой вид преобразования может служить полезным инструментом в решении задач поиска областей местности с характерными свойствами по изображениям, полученным с БПЛА.

2. Серии экспериментов позволили определить, что наиболее целесообразно для рассчета признаков использовать окно ДВП размером 256×256, при этом достаточно проводить трехуровневое вейвлет-преобразование.

3. Применение показателя, использующего характеристики результатов на разных уровнях вейвлет-преобразования в качестве индикатора области, позволило показать возможность выделения территорий с большой мощностью гумусированного слоя земли.

Список литературы

1. *Чандра, А. М.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.

2. *Шовенгердт, Р. А.* Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

3. *Назмутдинова, А. И.* Метод и признаки выявления культурного слоя археологических памятников по данным многозональной съёмки / А. И. Назмутдинова, В. Н. Милич, И. В. Журбин // Геоинформатика. – 2017. – № 1. – С. 52–58.

4. *Дремин, И. М.* Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – № 5. – С. 465–501.

5. *Короновский, А. А.* Непрерывный вейвлет-анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – М. : Физматлит, 2003. – 176 с.

6. *Назмутдинова, А. И.* Исследование зависимости результатов классификации многозональных изображений лесной растительности от параметров вейвлет-преобразования / А. И. Назмутдинова, В. Н. Милич // Автометрия. – 2016. – № 3 (52). – С. 20–27.

7. *Fdez-Sarria, A.* Study of methods based on wavelets for texture classification of the high resolution images / A. Fdez-Sarria, L. A. Ruiz, and J. A. Recio // Proc. of the 25th EARSeL Symposium “Global Developments in Environmental Earth Observation from Space”. – Porto, Portugal, 2005. – Pp. 19–27.

A. I. Nazmutdinova, CSc in engineering, researcher
V. N. Milich, CSc in engineering, head of division
E-mail: lssm@ftiudm.ru
Physical-Technical Unstitute UB RAS, Izhevsk, Russia

Wavelet Transform Application for Interpretation of the Data Obtained by Unmanned Aerial Vehicle

The technique of processing data obtained from an unmanned aerial vehicle to locate areas with certain distinctive characteristics is presented. The method is based on the use of image wavelet transform. The influence of the window size and the level of wavelet-transform on the correlation coefficient between the data obtained after processing and the reference data is investigated.

Keywords: Earth remote sensing, unmanned aerial vehicles, wavelet transform, multiscale analysis, area with characteristic properties

УДК 007.51

Ф. Б. Тебуева, д-р физ.-мат. наук, доц.
В. И. Петренко, канд. техн. наук, доц.
В. О. Антонов, аспирант
С. С. Рябцев, аспирант
E-mail: nalfartorn@yandex.ru
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Разработка алгоритма построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики*

Разработан алгоритм построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики при управлении устройством копирующего типа (экзоскелетом) трехзвенным антропоморфным манипулятором с семью степенями подвижности. Построение пространственного положения суставов руки оператора определяется через регистрацию углов поворота руки оператора для последующей передачи на исполнительное устройство (манипулятор). Предложенный алгоритм состоит из двух этапов, включающих в себя блоки формирования исходных данных и вывода расчетных данных для построения имитационной модели пространственного положения суставов руки оператора.

Ключевые слова: антропоморфный робот, экзоскелет, обратная задача кинематики, трехзвенный манипулятор.

Введение

Развитие робототехнических систем обусловлено необходимостью замены труда человека в потенциально опасных областях деятельности, сопряженных с рисками причинения вреда здоровью: в условиях повышенной радиации, в космосе, под водой, в чрезвычайных ситуациях, с объектами повышенной опасности (взрывчатые, химические вещества) [1, 2]. Перспективным видом управления данными роботами является использование копирующего управления, что особенно актуально для исполнительных устройств робота – манипуляторов. Копирующий тип

© Тебуева Ф. Б., Петренко В. И., Антонов В. О., Рябцев С. С., 2018

*Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПИР 2014–2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

управления реализуется одновременным формированием законов движения по всем степеням подвижности антропоморфного манипулятора через задающее устройство копирующего типа (экзоскелет) [1].

Экзоскелет представляет собой рычажную схему, оснащенную датчиками положения звеньев, активными и пассивными приводами. Кинематическая схема экзоскелета идентична схеме руки человека. В рабочем состоянии экзоскелет надевается на оператора, при этом рычажная система располагается параллельно руке человека. Это позволяет на основе регистрации углов поворота частей руки человека формировать законы движения звеньев манипулятора. Пример устройства копирующего типа представлен отечественной разработкой УКТ-3 научно-производственного объединения «Андроидная техника» – единственного в России производителя полномасштабных антропоморфных роботов (рис. 1) [3].



Рис. 1. УКТ-3 – устройство копирующего типа НПО «Андроидная техника»

Углы поворота руки человека выступают как обобщенные координаты, зависимые от координат узловых точек экзоскелета [4]. Для точного выполнения операций исполнительным устройством (антропоморфным манипулятором) необходимо снимать показания углов с экзоскелета. Для этого необходима разработка алгоритмов построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики.

Структура алгоритма

Алгоритм построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики представ-

лен для устройства копирующего типа УКТ-3 для управления трехзвенным антропоморфным манипулятором с семью степенями подвижности, необходимыми для работы в объемной рабочей зоне.

Предлагаемый алгоритм состоит из входных и выходных данных и двух этапов: выбор метода решения обратной задачи кинематики и расчет углов ориентации звеньев устройства копирующего типа. Схема алгоритма представлена на рис. 2.

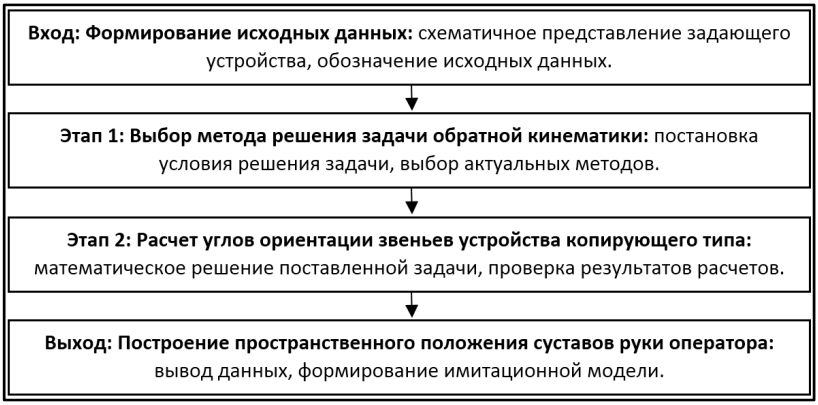


Рис. 2. Алгоритм построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики

Кратко рассмотрим содержание каждого из блоков алгоритма.

Описание эксперимента

Блок формирования исходных данных включает исходные данные и схему копирующего устройства.

Решение обратной задачи кинематики на примере УКТ-3 заключается в поиске углов ориентации звеньев задающего устройства на основе данных о звеньях и соединительных узлах. Поэтому *исходные данные* для расчетов представлены схемой устройства, исходными обозначениями и числовыми характеристиками длины звеньев устройства, координатами узловых точек.

Устройство копирующего типа состоит из трех звеньев: плечевое звено AB; локтевое звено BC; кистевое звено CD; $A\,(x_A;\ y_A; z_A), B(x_B; y_B;\ z_B), C(x_C; y_C; z_C), D(x_D; y_D; z_D)$ – точки плечевого, локтевого, лучезапястного и кистевого узлов соответственно. Длины звеньев AB, BC, CD обозначены как l_1, l_2, l_3. Количество степеней подвижности звеньев обозначены как количество углов ориента-

ции, где $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A$ – углы поворота звена AB по осям x, y, z соответственно; α_B – угол поворота звена BC по оси x; $\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ – углы поворота звена CD по осям x, y, z соответственно.

Задача обратной кинематики для построения пространственного положения суставов руки оператора заключается в поиске углов ориентации $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ звеньев исполнительного устройства при известных длинах l_1, l_2, l_3 звеньев AB, BC, CD и координатах узловых точек $A\ (x_A;\ y_A; z_A), B(x_B; y_B;\ z_B), C(x_C; y_C; z_C), D(x_D; y_D; z_D)$.

На первом этапе происходит выбор метода решения задачи обратной кинематики. Выбор актуального метода решения зависит от условий решения задачи. Для использования алгоритма в реальном времени и его самообучения рекомендуется использование нейросетевых методов. Для поиска допустимых, но не всегда оптимальных решений используются эволюционные методы. Аналитические методы используются в различных случаях, как для поиска оптимальных решений, так и для использования вычислительных методов при высокой сложности задачи. Кватернионные и бикватернионные методы особо эффективны для построения визуальных моделей и последующего управления манипуляторами при помощи графической оболочки.

Решение задачи

На втором этапе необходимо выполнить математическую постановку задачи и расчет вычисляемых углов ориентации по выбранному методу решения обратной задачи кинематики.

Решением задачи поиска углов ориентации звеньев AB, BC, CD устройства копирующего типа управления трехзвенным антропоморфным манипулятором с семью степенями подвижности является матрица $M(\lambda)$ углов поворота:

$$M(\lambda) = \left[\begin{array}{c|ccc} x & \alpha_A & \alpha_B & \alpha_C \\ y & \beta_A & 0 & \beta_C \\ z & \gamma_A & 0 & \gamma_C \end{array}\right]. \quad (1)$$

Матричный вид представления полученных данных необходимо использовать для прошивки микроконтроллеров задающего устройства.

Одним из способов решения задачи поиска является решение обратной задачи кинематики устройства копирующего типа УКТ-3 аналитическим методом, с постановкой задачи поиска решения нелинейных уравнений с шестью неизвестными с помощью обобщенного приведенного градиента. В ходе решения задачи начальные данные имеют следующий вид (рис. 3).

	A	B	C	D
x	0	0,94589	4,50302	5
y	0	3,56621	5,40362	6
z	0	3,37452	6,36965	7
l_1	5			
l_2	5			
l_3	1			

Рис. 3. Исходные данные для решения задачи поиска углов ориентации УКТ-3 методом обобщенного приведенного градиента

Отображение результатов решения задачи поиска углов ориентации УКТ-3 в матричном виде показано на рис. 4.

	AB	BC	CD
x	15,65839	34,53604	0,00000
y	43,41798	6,27277	5,98073
z	15,65839	19,59999	19,87929

Рис. 4. Матричная форма отображения результатов решения задачи поиска углов ориентации УКТ-3 методом обобщенного приведенного градиента

На выходе алгоритма необходимо выполнить проверку точности решения, сделать вывод о эффективности используемых методов, интерпретировать результаты решения и, при необходимости, выполнить построение имитационной модели.

Результаты и их обсуждение

Разработанный алгоритм построения пространственного положения суставов руки оператора базируется на поиске углов ориентации звеньев задающего устройства управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота.

Для работы алгоритма необходимо решение обратной задачи кинематики. Выбор метода решения обусловлен условиями решения задачи, среди которых стоит выделить возможность самообучения робототехнической системы, работу в реальном или условном формате времени, поиск оптимального или допустимого решения задачи, возможность последующего управления через графический интерфейс и т. д.

Выводы

В данной статье разработан алгоритм построения пространственного положения суставов руки оператора на основе решения обратной задачи кинематики на примере устройства копирующего типа УКТ-3 для управления трехзвенным антропоморфным манипулятором с 7-ю степенями подвижности для выполнения работы в объемной рабочей зоне.

Рассмотрены методы решения обратной задачи кинематики на основе аналитических, нейросетевых, эволюционных и кватернионных методов.

Изложен выбор метода решения обратной задачи кинематики в зависимости от необходимых условий решения задачи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору, профессору кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов Магнитогорского государственного технического университета Ильдару Мухаметовичу Кутлубаеву за ценные советы при планировании исследования.

Список литературы

1. Копирующий манипулятор: пат. 135956 Рос. Федерация : МПК^{51} B25J3/00 / Богданов А. А., Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М., Кияткин Д. В., Пермяков А. Ф. ; заявитель и патентообладатель публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (ПАО «НПО «Андроидная техника»). – № 2013122162/02 ; заявл. 14.05.2013 ; опубл. 27.12.2013, Бюл № 36. – 6 с.

2. *Тебуева, Ф. Б.* Способ формирования стратегий адаптивного поведения антропоморфных робототехнических систем / Ф. Б. Тебуева, В. Б. Сычков, С. С. Рябцев // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1–2. – С. 138–140.

3. УКТ-3 НПО «Андроидная техника» [Электронный ресурс] // НПО «Андроидная техника» [Сайт]. – URL: https://npo-at.com/products/«аватар»/ (дата обращения: 25.10.2017).

4. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / В. С. Кулешов, Н. А. Лакота, В. В. Андрюнин и др.; под общ. ред. Е. П. Попова. – М. : Машиностроение, 1986. – 328 с.

5. *Жиденко, И. Г.* Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором / И. Г.Жиденко, И. М. Кутлубаев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5. – С. 41–46.

F. B. Tebueva, DSc in phys. and math., associate professor
V. I. Petrenko, CSc in engineering, associate professor
V. O. Antonov, postgraduate student
S. S. Ryabtcev, postgraduate student
E-mail: nalfartorn@yandex.ru
North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Development of an Algorithm for Constructing the Spatial Position of the Joints of the Operator's Hand on the Basis of Solving the Inverse Task of Kinematics

An algorithm for constructing the spatial position of the joints of the operator's hand is developed on the basis of solving the inverse problem of kinematics in controlling a copying type device (exoskeleton) by a three-link anthropomorphic manipulator with 7 degrees of mobility. The construction of the spatial position of the operator's joints is determined through the registration of the operator's rotation angles for subsequent transfer to the executive device (manipulator). The proposed algorithm consists of two stages, including blocks for generating initial data and outputting calculated data for constructing an imitation model of the spatial position of the operator's joints.

Keywords: anthropomorphic robot, exoskeleton, inverse kinematics, three-link manipulator

УДК 007.51

Ф. Б. Тебуева, д-р физ.-мат. наук, доц.
В. И. Петренко, канд. техн. наук, доц.
В. О. Антонов, аспирант
В. Б. Сычков, аспирант
E-mail: Ant.vl.02@gmail.com
Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь

Разработка способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора*

Разработан способ решения задачи регистрации углов поворота руки оператора для передачи на исполнительное устройство, базирующейся на решении обратной задачи кинематики устройства копирующего типа для регист-

© Тебуева Ф. Б., Петренко В. И., Антонов В. О., Сычков В. Б., 2018

*Исследование выполнено в рамках реализации научного проекта по теме «Разработка программно-аппаратного комплекса системы управления на основе решения обратной задачи динамики и кинематики» в рамках ФЦПИР 2014–2020 (уникальный идентификатор RFMEFI57517X0166) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

рации обобщенных координат, выраженных углами поворота звеньев задающего устройства и их передачи на трехзвенный манипулятор с семью степенями подвижности. Предложены формулы расчета углов ориентации звеньев устройства копирующего типа в зависимости от положения узлов устройства в пространстве. Полученные результаты могут быть использованы в современных системах управления робототехническими системами в реальном времени.

Ключевые слова: антропоморфный робот, экзоскелет, обратная задача кинематики, трехзвенный манипулятор, обобщенные координаты.

Введение

Антропоморфные манипуляторы с копирующим способом управления предназначены для замены человека при выполнении работ, сопряженных с рисками причинения вреда здоровью: в условиях повышенной радиации, в космосе, под водой, в чрезвычайных ситуациях, с объектами повышенной опасности (взрывчатые, химические вещества) [1, 2]. В основе способа управления лежит одновременное формирование законов движения по всем степеням подвижности антропоморфного манипулятора через задающее устройство копирующего типа (экзоскелет) [1].

Экзоскелет представляет собой рычажную схему, оснащенную датчиками положения звеньев, активными и пассивными приводами. Кинематическая схема экзоскелета идентична кинематической схеме руки человека. В рабочем состоянии экзоскелет надевается на оператора, при этом рычажная система располагается параллельно руке человека. Это позволяет на основе регистрации углов поворота частей руки человека формировать законы движения звеньев манипулятора. Следует также иметь в виду, что оператор помимо функций управления задающим устройством манипулятора часто выполняет такие задачи, как настройка аппаратуры. При этом требуется фиксировать положение задающего устройства в каждой из степеней подвижности [4].

Необходимо решение обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора.

Постановка задачи

Обратная задача кинематики заключается в поиске углов поворота звеньев устройства копирующего типа на основе данных о длине звеньев и координатах положения руки оператора в пространстве.

Решение обратной задачи кинематики рассмотрено на примере устройства копирующего типа (УКТ-3) научно-производственного объе-

динения НПО «Андроидная техника» для управления трехзвенным антропоморфным манипулятором с семью степенями подвижности [2]. Данное устройство позволяет управлять трехзвенными манипуляторами антропоморфных роботов серии SAR-400, AR-600, Fedor. На рис. 1 отображен процесс управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота Fedor при помощи устройства копирующего типа.

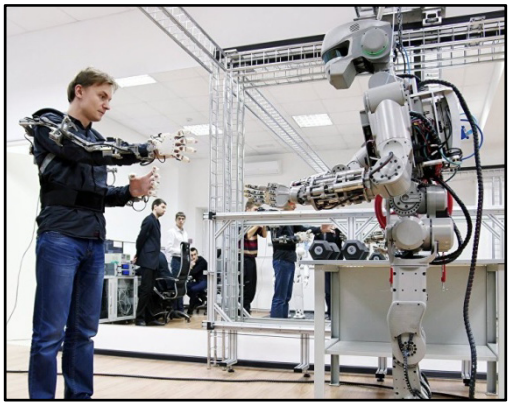


Рис. 1. Процесс управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота Fedor при помощи устройства копирующего типа

Схема устройства копирующего типа управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота с семью степенями подвижности представлена на рис. 2, где:

$A\ (x_A;\ y_A; z_A)$ – точка плечевого узла;

$B(x_B; y_B;\ z_B)$ – точка локтевого узла;

$C(x_C; y_C; z_C)$ – точка лучезапястного узла;

$D(x_D; y_D; z_D)$ – точка кистевого узла;

l_1, l_2, l_3 – длины плечевого (AB), локтевого (BC) и кистевого (CD) звеньев соответственно;

$\alpha_A, \beta_A, \gamma_A$ – углы поворота звена AB по осям y, z, x соответственно;

α_B – угол поворота звена BC по оси y;

$\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ – углы поворота звена CD по осям y, z, x соответственно.

l_{AC}, l_{AD} – расстояние от плечевого до лучезапястного (AC) и кистевого (BC) узла.

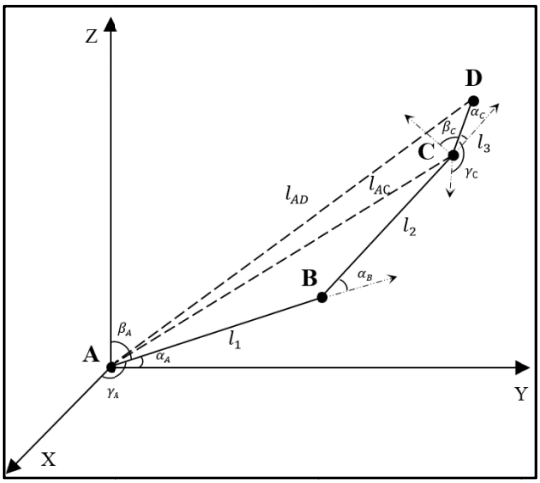


Рис. 2. Схема устройства копирующего типа управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота с семью степенями подвижности

Задача решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора заключается в поиске углов ориентации α_A, β_A, γ_A, α_B, α_C, β_C, γ_C звеньев *AB, BC, CD* при известных координатах точек плечевого, локтевого, лучезапястного и кистевого узла $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $C(x_C, y_C, z_C)$, $D(x_D, y_D, z_D)$ и длин плечевого (*AB*), локтевого (*BC*) и кистевого (*CD*) звеньев l_1, l_2, l_3.

Описание эксперимента

Для расчета углов ориентации α_A, β_A, γ_A плечевого (*AB*) звена представим его в векторной форме, т. е. $AB = \overline{AB}$, где точки $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$ являются координатами начала и конца вектора. Точка плечевого узла находится в начале отсчета системы координат, следовательно, $A(x_A; y_A; z_A) = A(0;0;0)$

Таким образом, поиск углов ориентации α_A, β_A, γ_A плечевого звена *AB* сводится к нахождению угла прямоугольного треугольника по двум сторонам, представленным проекцией вектора $\overline{AB}$ на координатные оси.

Углы ориентации звена *AB* произведем следующим образом:

$$\angle\alpha_A = \arccos\left(\frac{y_B}{\sqrt{y_B^2 + z_B^2}}\right); \qquad (1)$$

$$\angle\beta_A = \arccos\left(\frac{z_B}{\sqrt{z_B^2 + x_B^2}}\right); \tag{2}$$

$$\angle\gamma_A = \arccos\left(\frac{x_B}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}\right). \tag{3}$$

Для расчета угла ориентации α_B локтевого (BC) звена представим в векторной форме расстояние от плечевого до лучезапястного (AC) узла, т. е. $AC = \overline{AC}$, где точки $A\,(x_A; y_A; z_A), C(x_C; y_C; z_C)$ являются координатами начала и конца вектора.

Угол ориентации звена BC произведем следующим образом:

$$\angle\alpha_B = \angle\alpha_{AC} - \angle\alpha_A. \tag{4}$$

Произведем расчет угла $\angle\alpha_{AC}$:

$$\angle\alpha_{AC} = \arccos\left(\frac{y_c}{\sqrt{y_C^2 + z_C^2}}\right). \tag{5}$$

Тогда формула расчета угла ориентации $\angle\alpha_B$ звена BC примет вид:

$$\angle\alpha_B = \arccos\left(\frac{y_c}{\sqrt{y_C^2 + z_C^2}}\right) - \arccos\left(\frac{y_B}{\sqrt{y_B^2 + z_B^2}}\right). \tag{6}$$

Для расчета углов ориентации $\alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ кистевого CD звена представим в векторной форме расстояние от плечевого до кистевого AD узла, т. е. $AD = \overline{AD}$, где точки $A\,(x_A; y_A; z_A), D(x_D; y_D; z_D)$ являются координатами начала и конца вектора.

Углы ориентации звена CD произведем следующим образом:

$$\angle\alpha_D = \angle\alpha_{AD} - \angle\alpha_{AC}; \tag{7}$$

$$\angle\beta_D = \angle\beta_{AD} - \angle\beta_A; \tag{8}$$

$$\angle\gamma_D = \angle\gamma_{AD} - \angle\gamma_A. \tag{9}$$

Произведем расчет углов $\angle\alpha_{AD}, \angle\beta_{AD}, \angle\gamma_{AD}$:

$$\angle\alpha_{AD} = \arccos\left(\frac{y_D}{\sqrt{y_D^2 + z_D^2}}\right); \quad (10)$$

$$\angle\beta_{AD} = \arccos\left(\frac{z_D}{\sqrt{z_D^2 + x_D^2}}\right); \quad (11)$$

$$\angle\gamma_{AD} = \arccos\left(\frac{x_D}{\sqrt{x_D^2 + y_D^2}}\right). \quad (12)$$

Тогда формула расчета углов ориентации $\angle\alpha_D, \angle\beta_D, \angle\gamma_D$ звена CD примет вид:

$$\angle\alpha_D = \arccos\left(\frac{y_D}{\sqrt{y_D^2 + z_D^2}}\right) - \arccos\left(\frac{y_c}{\sqrt{y_C^2 + z_C^2}}\right); \quad (13)$$

$$\angle\beta_D = \arccos\left(\frac{z_D}{\sqrt{z_D^2 + x_D^2}}\right) - \arccos\left(\frac{z_B}{\sqrt{z_B^2 + x_B^2}}\right); \quad (14)$$

$$\angle\gamma_D = \arccos\left(\frac{x_D}{\sqrt{x_D^2 + y_D^2}}\right) - \arccos\left(\frac{x_B}{\sqrt{x_B^2 + y_B^2}}\right). \quad (15)$$

Решение задачи

Способ решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора представлен как решение задачи поиска углов ориентации $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ звеньев AB, BC, CD устройства копирующего типа для управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота с семью степенями подвижности по формулам (1)–(3), (6), (13)–(15).

Результаты и их обсуждение

Результатом предложенного способа решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора являются расчетные данные углов ориентации α_A, $\beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ звеньев AB, BC, CD устройства копирующего типа.

Среди недостатков разработанного способа следует выделить проблему возможного сбоя решения в том случае, когда координаты узла

имеют нулевые точки по двум координатным осям. В таком случае решение задачи по формулам (1)–(3), (6), (13)–(15) имеют сложность с вычислением обратной тригонометрической функции (арккосинуса) по причине ошибки при делении на ноль.

Для устранения данного недостатка предлагается в случае ошибки принимать значение угла равное 0°, что соответствует действительности и позволяет применять предложенный способ.

Выводы

В данной статье разработан способ решения обратной задачи кинематики для определения пространственного положения суставов руки оператора через задачу поиска углов ориентации $\alpha_A, \beta_A, \gamma_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C$ звеньев AB, BC, CD на примере устройства копирующего типа УКТ-3 для управления трехзвенным манипулятором антропоморфного робота с семью степенями подвижности, разработчиком которого выступает научно-производственное объединение «Андроидная техника» [2].

По результатам исследования получены формулы зависимости углов ориентации звеньев устройства копирующего типа от положения узлов устройства в пространстве.

Предложенный способ отличается возможностью его использования в современных системах управления робототехническими системами в реальном времени, при этом имеет простую структуру, что позитивно сказывается на возможностях его программной реализации, а также на повышении точности работы исполнительного устройства за счет формирования задающим устройством значений углов поворота, совпадающих с плечом оператора.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору, профессору кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов Магнитогорского государственного технического университета Ильдару Мухаметовичу Кутлубаеву за ценные советы при планировании исследования.

Список литературы

1. Копирующий манипулятор: пат. 135956 Рос. Федерация : МПК^{51} B25J3/00 / Богданов А. А., Жиденко И. Г., Кутлубаев И. М., Кияткин Д. В., Пермяков А. Ф. ; заявитель и патентообладатель публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Андроидная техника»

(ПАО «НПО «Андроидная техника»). – № 2013122162/02 ; заявл. 14.05.2013 ; опубл. 27.12.2013, Бюл № 36. – 6 с.

2. *Тебуева, Ф. Б.* Способ формирования стратегий адаптивного поведения антропоморфных робототехнических систем / Ф. Б. Тебуева, В. Б. Сычков, С. С. Рябцев // Электронные средства и системы управления. – 2016. – № 1–2. – С. 138–140.

3. УКТ-3 НПО «Андроидная техника» [Электронный ресурс] // НПО «Андроидная техника». – URL: https://npo-at.com/products/«аватар»/ (дата обращения: 25.10.2017).

4. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / В. С. Кулешов, Н. А. Лакота, В. В. Андрюнин и др.; под общ. ред. Е. П. Попова. – М. : Машиностроение, 1986. – 328 с.

5. *Жиденко, И. Г.* Методика определения сигналов управления антропоморфным манипулятором / И. Г. Жиденко, И. М. Кутлубаев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5. – С. 41–46.

F. B. Tebueva, DSc in phys. and math., associate professor
V. I. Petrenko, CSc in engineering, associate professor
V. O. Antonov, postgraduate student
V. B. Sychkov, postgraduate student
E-mail: Ant.vl.02@gmail.com
North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Development of a Method for Solving the Inverse Task of Kinematics for Determining the Spatial Joints Position of the Operator's Hand

A method is developed to solve the registration rotation angles of the operator's hands for transmission to the actuating device, based on the solution of the inverse kinematic problem of the copying device of the type for check of generalized coordinates expressed by the angles of rotation of links of the master device transfers a three-link manipulator with 7 degrees of mobility. The proposed formula for calculating the angles of orientation of the links in the copy device type from the node locations of the device in space. The obtained results can be used in modern control systems, robotic systems in real-time.

Keywords: anthropomorphic robot, exoskeleton, inverse kinematics, three-link manipulator, generalized coordinates.

Электронное научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ В XXI ВЕКЕ – 2017.
ИНТЕГРАЦИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Сборник материалов XIII Международной
научно-технической конференции
(Ижевск, 22–24 ноября 2017 года)

Адрес в информационно-телекоммуникационной сети:
http://pribor21.istu.ru/proceedings/Pribor21_2017.pdf

Дата размещения на сайте: 18.06.2018

Технический редактор *С. В. Звягинцова*
Корректор *И. В. Ганеева*
Верстка *С. Е. Фокиной*

Подписано к использованию 08.06.2018. Объем 25,9 Мб.
Уч.-изд. л. 28,73. Заказ № 128

Издательство Ижевского государственного технического университета
имени М. Т. Калашникова
426069, Ижевск, Студенческая, 7

www.PDFCool.com